



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS
ARQUITECTÒNIQUES I

Tesis doctoral

APORTACIONES AL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DEFORMACIONAL DE PASTAS DE CAL. TAMAÑO Y FORMAS DE LAS PARTÍCULAS Y SU VISCOSIDAD

Doctorando: Joan Ramon Rosell i Amigó

Programa: Tecnologia a l'arquitectura, l'edificació i l'urbanisme

Directores: Dr. Jaume Avellaneda Díaz Grandes
Dra. Inmaculada Rodríguez Cantalapiedra

Barcelona. 2013



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS
ARQUITECTÒNIQUES I

Tesis doctoral

**APORTACIONES AL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO
DEFORMACIONAL DE PASTAS DE CAL.
TAMAÑO Y FORMAS DE LAS PARTÍCULAS Y SU VISCOSIDAD.**

Doctorando:

Joan Ramon Rosell i Amigó

Programa:

Tecnologia a l'arquitectura, l'edificació i l'urbanisme

Directores:

Dr. Jaume Avellaneda Díaz Grande

Dra. Inmaculada Rodríguez Cantalapiedra

Barcelona, Mayo 2013

Fotografía de la portada cedida por
Don Manuel Gil, director del Museo de la Cal
de Morón de la Frontera (Sevilla)

Índice de contenidos

Índice de contenidos	3
Agradecimientos	15
Resumen	17
Palabras clave	19
 1 Motivación y objetivos	 21
 2 Introducción	 27
2.1 Conglomerante tradicional	27
2.3 Hidraulicidad y puzolanidad	34
2.6 Uso actual de la cal en la arquitectura y la construcción. Cal vs cemento.	47
2.7 La cal y el conocimiento popular y científico	52
 3 Estado del arte	 55
3.1 Del ciclo de la cal	56
3.1.1 De la cocción y del apagado	56
3.1.2 Sobre la cristalización de la portlandita y el proceso de agregación	60
3.1.3 Discusión del envejecimiento de la cal en pasta	64
3.1.4 La carbonatación de los morteros de cal	70
3.2 Comportamiento reológico de las pastas	73
3.2.1 Introducción	73
3.2.2 Fundamento teórico de la medida de la viscosidad	76
3.2.3 Factores que rigen la reología de las pastas	83
3.2.4 Estudios anteriores de reología de pastas de cal	84
 4 Campaña experimental	 93
4.1 Objetivos de la experimentación	93
4.2 Materiales utilizados	94
4.2.1 Cales en pasta	95
4.2.2 Cales en polvo	96
4.2.3 Pastas de cal “envejecidas”	98
4.3 Equipos y métodos experimentales	99

4.3.1 Caracterización de las partículas	99
4.3.2 Medida de la viscosidad. Metodología	102
4.3.2.1 Equipo de ensayo. Viscosímetro.....	104
4.3.2.1.2 Velocidad de rotación y sensor	105
4.3.2.1.3 Temperatura de ensayo	108
4.3.2.1.4 Concentración de la dispersión	109
4.3.2.1.5 Tiempo de lectura	110
4.3.2.1.6 Influencia del amasado	115
4.3.2.2 Estudio de las medidas de viscosidad para rampa de variaciones discretas de velocidad o lecturas independientes.....	116
4.3.2.3 Protocolo de medida de viscosidad en suspensiones de cal adoptado por <i>labancadellacalce</i>	121
4.3.2.4 Metodología seguida para la medida de la viscosidad	122
5 Resultados	125
5.1 Caracterización de partículas	126
5.1.1 Tamaño de partícula en cales añejas y cales contemporáneas	126
5.1.1.1 Introducción.....	126
5.1.1.2 DRX y granulometría láser. Resultados y análisis.....	131
5.1.2 Influencia del apagado de la cal en el tamaño de partícula	138
5.1.2.1 Introducción.....	138
5.1.2.2 Apagados de una cal dolomítica en Zone, Italia.....	139
5.1.2.3 Apagados realizados por Gordillo's en Morón de la Frontera (España)	157
5.1.2.4 Apagados realizados por Unicmall en Mallorca (España)	164
5.1.2.5 Apagados realizados por Oriol García en Barcelona	177
5.1.2.6 Discusión de resultados de los diferentes apagados.	181
5.1.3 Observaciones con microscopia electrónica	183
5.1.3.3 Discusión de los resultados observados en las microscopias.	203
5.2 Viscosidad de cales en pasta y pastas de cal.....	206
5.2.1 Viscosidad de cales en pasta añejas y pastas de cal.....	207
5.2.1.1 Concentraciones alrededor del 38 %	207
5.2.1.2 Concentración del 30%.....	218
5.2.1.3 Discusión referente a la viscosidad de las cales añejas.....	221
5.2.2 Evolución de la viscosidad en pastas de cal.	222
5.2.2.1 Planteamiento de la experimentación con pastas de cal.....	222

5.2.2.2 Preparación y codificación de muestras.....	222
5.2.2.3 Resultados y análisis	225
5.2.2.3.1 De la primera serie PACHS CL 90 S.....	225
5.2.2.3.2 De la segunda serie PACHS CL 90 S.	227
5.2.2.3.3 De la serie PACHS 80 S, Ciaries 80, Caplansa 80, Tudela Veguin 90	231
5.2.3 Determinación empírica del posible efecto en la viscosidad de procesos energéticos de amasado.....	234
6 Conclusiones	241
6.1 Referente a las metodologías de caracterización	242
6.2 De las cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC).....	243
6.3 De los apagados con métodos tradicionales y semi-industriales	244
6.4 De la evolución de las pastas de cal con el tiempo.....	244
7 Bibliografía.....	247
8 Anexos.....	255
Anexo 1. Hacia un sistema-mortero para intervención en restauración.....	257
Anexo 2. Características reológicas de pastas de cal.....	263
Anexo 3. Poster “Características reológicas de pastas de cal”	277
Anexo 4. ¿Existen diferencias en las cales apagadas por distintos métodos tradicionales?: la experiencia de Zone (BS)	281
Anexo 5 Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento.....	289
Anexo 6 Algunas consideraciones sobre la cal y sus morteros.....	301
Anexo 7 El forn de raig	313
Anexo 8. Cuestiones de nomenclatura	323
Anexo 9. Grout puzolánico de altas prestaciones	335

Índice de figuras

Figura 1 Pruebas de color en los morteros de restauración de la Torre de defensa del Monasteri de Sant Pere de Rodes (Girona).	24
Figura 2 Calera tradicional redonda de Yucatán y Campeche (7).	28
Figura 3 Diversas ilustraciones que muestran la cocción tradicional del yeso en Albarracín (Teruel) (8).	29
Figura 4 Figura correspondiente a la reconstrucción gráfica realizada en 1987 de la sección de un horno tradicional de producción de cal en la comarca del Montsià en Cataluña (9).	29
Figura 5 Sección correspondiente al levantamiento gráfico del "forn de raig" de Calders, Barcelona. (Anexo 7).	30
Figura 6 Representación ilustrada del ciclo de la cal (22).	32
Figura 7 Mortero de junta de fábrica de albañilería donde se observan nódulos de cal y chamota de distintos tamaños. Alhambra de Granada.	35
Figura 8 Figura de "máquina" para apagar la cal por inmersión y obtener cal hidratada en polvo, extraído de Espinosa, P.C. Manual de construcción de albañilería (29).	36
Figura 9 (a) Vista general de los hornos tradicionales, (b) interior del horno, en el proceso de construir la bóveda, (c) acopio exterior de biomasa para la cocción nocturna, (d) en la fase de cocción es necesario, de forma periódica, rehacer el caramullo que va descendiendo, (e) vista exterior del horno en combustión.	38
Figura 10 Vista general de la fábrica. (www.Google 2011).	39
Figura 11 Esquema del horno rotatorio.	40
Figura 12 Vista de la zona del quemador del horno y el circuito de calentamiento del fuel.	40
Figura 13 Vista del apagador (<i>fonedor</i>).	40
Figura 14 Vista de las balsas de envejecimiento.	40
Figura 15 Vista general de la fábrica. (www.Google 2011)	41
Figura 16 Figura presentada por A. Rattazzi en la que se relaciona la energía relativa aplicada para producir óxido de cal en función de la tecnología disponible (36).	44
Figura 17 Efecto de la migración a la superficie de sales solubles en una intervención local en un muro con un mortero que contiene cemento portland. Monasterio de Sant Pere de Rodes, Girona.	50
Figura 18 Figura extraída de (46) en la que se ilustran las 5 etapas del proceso de cocción del carbonato cálcico.	56
Figura 19 Figura extraída de (47), en la que se ilustra el efecto del tamaño de partícula del mineral respecto de la deshomogeneidad del producto calcinado.	57
Figura 20 Efecto de la temperatura de la disolución en la solubilidad de la cal. Gráfico generado a partir de los datos de National Lime Association (53).	59
Figura 21 La estructura del cristal de hidróxido cálcico está constituida por capas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que tienen simetría hexagonal. Los átomos de hidrógeno (H) se encuentran enlazados alternativamente en sentidos opuestos en las direcciones normales al plano de la capa (Ca = violeta, O = azul celeste, H = blanco). Las capas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ están ligadas molecularmente mediante fuerzas de Van der Waals, con el resultado de que los cristales hexagonales tienen una división basal perfecta. Imagen procedente de (58).	61
Figura 22 Representación de un cristal laminar de portlandita con las direcciones principales.	61
Figura 23 PSD procedente del trabajo publicado por Carlos Rodríguez-Navarro y otros (60) en el que se muestra el carácter polimodal de las distribuciones y el efecto de aglomeración de partículas como consecuencia del secado en estufa de una cal en pasta. Distribución de tamaños de partículas de (■) una cal en pasta, (○) cal apagada en polvo comercial, (Δ) cal en pasta desecada.	62
Figura 24 fotomicrografías FESEM de (a) cal en pasta desecada en estufa mostrando la aglomeración de nanocristales lameliformes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y (b) cal hidratada seca comercial, que muestran la aglomeración extensa. En las dos partes A y B, los agregados orientados al azar y orientados cristalográficamente están presentes. (C) Detalle de un	

agregado orientado representante de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nanopartículas unidos por los planos (0001) y (d) los agregados orientados al azar en muestras de cal sublimadas apagada.	63
Figura 25 Microfotografías SEM: (a) Cristales de portlandita de una cal en pasta de reciente apagado; (b) evolución de los cristales de portlandita mostrando características de corrosión en una cal en pasta de dos meses; (c) pasta de un año que muestra cristales laminares submicrométricos de portlandita creciendo en cristales de portlandita preexistentes; (d) detalle pasta de un año ídem anterior (66).	65
Figura 26 Relación entre la superficie específica de cristales de portlandita y el tamaño de las partículas. (1) cristales tabulares de esbeltez 1:10, (2) cristales prismáticos de esbeltez 1:1. Obtenido de (61).	66
Figura 27 Ensayo de reactividad durante el apagado de las cales: la temperatura (T) versus tiempo para ACQ (■) y FGQ (□). Fotomicrografías representativas realizadas con TEM de los dos tipos de cal. Obtenido de (56).	67
Figura 28 Distribución de tamaño de partícula de FGP (a, b) y ACP (c, d) obtenidos del análisis de imágenes digitales del TEM (A y C) y granulometría láser de dispersión (B y D). Leyenda: (○) pastas a las 6 h después de ser apagadas, (■) pastas 3 años de edad. Obtenido de (56).	68
Figura 29 Esquema del mecanismo de formación de pequeños cristales laminares a partir de un cristal prismático (superior) y del mecanismo de formación de un único cristal laminar de gran dimensión a partir de pequeños cristales prismáticos de portlandita (inferior) Obtenido de (57).	70
Figura 30 Ejemplo de líneas de Liesegang en el avance de la carbonatación de una probeta de mortero de cal aérea (75).	72
Figura 31 Imagen del resultado erosivo en un mortero de cal procedente de un contrafuerte centenario de la torre del pueblo de Tor, en Girona.	72
Figura 32 Resultado de la aplicación de una disolución alcohólica de fenoltaleína a la rotura reciente de una probeta de mortero mixto de cemento portland y cal aérea. Fuente (2).	72
Figura 33 Imagen correspondiente al Plasticímetro Emley, extraída de la norma ASTM C 110 (80).	74
Figura 34 Imagen correspondiente a la parte superior del Plasticímetro Emley donde se observa el soporte poroso y la muestra objeto de ensayo (79).	75
Figura 35 Modelo esquemático que ilustra el movimiento de un fluido al aplicar un esfuerzo cortante.	77
Figura 36 Curvas de fluidez para diferentes modelos de comportamiento de fluidos.	79
Figura 37 Curvas de viscosidad para diferentes modelos de comportamiento de fluidos.	81
Figura 38 Curvas de flujo y de viscosidad para fluido pseudoplástico y dilatante.	81
Figura 39 Curvas correspondientes a los comportamientos reopéxico y tixotrópico de algunos fluidos al aplicarles un esfuerzo de corte constante.	82
Figura 40 Curvas de flujo de un fluidos pseudoplásticos de comportamientos reopéxico y tixotrópico.	82
Figura 41 Medidas de esfuerzo cortante aplicado a diferentes cales (A) cal en pasta añeja de tres años, (B) cal en pasta añeja de tres meses (C) cal recién apagada, y a diferentes velocidades a lo largo de 720 segundos. Obtenido de (82)	85
Figura 42 Rutinas de aplicación del esfuerzo de corte con reómetro con cilindros coaxiales ranurados.	87
Figura 43 Curvas de flujo para (a) FCP y (b) ACP con una fracción de volumen alrededor de 0,17 (□ es rama ascendente, ■ corresponde a rama descendente). Representación log-log de la viscosidad vs velocidad de cizalla y línea de ajuste (56).	88
Figura 44 Efecto del tiempo de envejecimiento (t) en el esfuerzo cortante aplicado (a) a la velocidad de deformación constante $\dot{\gamma}=250\text{s}^{-1}$ y (b) de fluencia (σ_0) de la FGP (■) y ACP (□).	89
Figura 45 Curvas de flujo y de viscosidad de una cal CL y otra DL para distintas concentraciones.	90

Figura 46 Procedimientos reológicos de medición aplicados (88).	91
Figura 47 Balsas de apagado en Moralsa. Foto procedente de www.emilioquilez.com	95
Figura 48 Termograma, representación gráfica de la pérdida de masa para una variación de temperatura.	100
Figura 49 Difractograma de una muestra de cal, con la superposición de los patrones correspondientes a la portlandita (rojo) y a la calcita (azul).	101
Figura 50 Vistas del Viscosímetro rotacional, tipo Brookfield, Viscotester 7L plus de la marca Haake.	104
Figura 51 Husillos L1 a L4 y tabla de valores de viscosidad máxima, medible para cada velocidad.	107
Figura 52. Medidas de tensiones de corte a bajas velocidades de tres concentraciones de una misma cal (Sevilla) y modelo de comportamiento de ley de potencia, ajustado a las determinaciones realizadas a 700 segundos.	110
Figura 53. . Ejemplo de representación de la evolución de la viscosidad a lo largo del tiempo de ensayo para tres ecuaciones que siguen el modelo de ajuste exponencial con valores de $\square_e = 1,3$ $\square_M = 6$ y $T = 500/300/100$ respectivamente.	111
Figura 54. Representación de la evolución de la viscosidad a lo largo del tiempo de ensayo para dos ecuaciones que siguen el modelo de ajuste potencial con valores de $k = 10 / 32$ y $b = -0.25 / -0.4$ respectivamente, comparados con los modelos exponenciales de la figura anterior.	112
Figura 55 Tensión de corte vs tiempo de ensayo para una misma muestra de cal en pasta a 20 y a 30 °C, a velocidad de giro constante de 192,5 s ⁻¹ , procedente de Atzeni y otros (82).	112
Figura 56. Gráficos correspondientes a la determinación de las tensiones de corte aplicadas para mantener bajas velocidades (1.5 a 10 rpm) de una cal en pasta. (a) Muestra el gráfico completo de la medida de 0 a 700 segundos. (b) Ampliación del gráfico (a) para el intervalo de 500 a 700 segundos.	113
Figura 57. Curvas de flujo correspondientes a tres determinaciones de una misma pasta. Se puede observar como el resultado a un determinado tiempo no es suficiente para definir la medida.	114
Figura 58. Agitador rotacional utilizado para el amasado previo al ensayo de las pastas de cal.	115
Figura 59. Gráficos que muestran el procedimiento velocidad-tiempo seguido para cada una de las dos metodologías estudiadas (MS), (R)	117
Figura 60. Resultados correspondientes a la medida de las tensiones de cortante aplicadas a la muestra Aries CL80 S, para cada velocidad de corte, de 0 a 90 segundos.	117
Figura 61. Resultados correspondientes a 90 segundos de la medida de las tensiones de corte aplicadas para mantener cada velocidad de giro (Tau (Pa)), a las viscosidades calculadas (Viscosidad (Pa•s)) y a la modelización del comportamiento de una pasta de cal realizada en laboratorio, a partir de una cal hidratada en polvo de origen industrial (Pachs CL 80 S), en una concentración del 38%.	118
Figura 62. Resultados correspondientes a 90 segundos de la medida de las tensiones de corte aplicadas para mantener cada velocidad de giro (Thau (Pa)), a las viscosidades calculadas (Visxcosidad (Pa•s)) y a la modelización del comportamiento de una pasta de cal realizada en laboratorio, a partir de una cal hidratada en polvo de origen industrial (Aries CL 80 S), en una concentración del 38%.	118
Figura 63. Curvas de fluidez de los resultados anteriores a escalas ordinarias.	120
Figura 64 Esquema de aplicación del amasado previo (rojo) y secuencia creciente discontinua de velocidades de rotación-reposo (azul).	123
Figura 65 Gráfico explicativo del proceso de lectura correspondiente a la rutina del protocolo A2	124
Figura 66 Clasificación esquemática de diferentes granos de arena, extraída de (97).	126
Figura 67 Diferentes esferas equivalentes a una cierta partícula (97).	127

Figura 68 Distintas formas de caracterizar mediante LALLS las dos mismas muestras de cal.	128
Figura 69 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC) en función de la edad de envejecimiento.	133
Figura 70 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta OG de diferentes antigüedades en función de la edad de envejecimiento.	134
Figura 71 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC) frente al tamaño de partículas expresado en el percentil 10%.	135
Figura 72 Distribución de tamaños de partículas de las pastas de cal de “Calcinor n”, en volumen y en número de partículas.	136
Figura 73 Valores de los percentiles 10, 50 y 95 de los tamaños de partículas frente a la edad de envejecimientos, correspondientes a las cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC).	137
Figura 74 Vistas superior e inferior del horno.	139
Figura 75 Balsa de apagado al inicio del proceso.	140
Figura 76 Proceso de apagado por aspersión.	141
Figura 77 Proceso de apagado “Grande agua”.	142
Figura 78 Apagado por inmersión breve.	143
Figura 79 Mediciones de temperaturas con termopares y termovisión, al inicio del apagado.	145
Figura 80 Termografía correspondiente a la zona de descarga del horno.	146
Figura 81 Termografías de la balsa de madera durante el apagado de la cal.	146
Figura 82 Detalle de las temperaturas alcanzadas durante el apagado en balsa, se alcanzan hasta 99°C.	147
Figura 83 La temperatura de la pasta de cal una vez homogeneizada en la balsa ronda los 50°C.	147
Figura 84 Evolución de las temperaturas durante la etapa de decantación del apagado en balsa.	148
Figura 85 Termografía del proceso de apagado “Grande Aqua”.	148
Figura 86 Evolución de las temperaturas durante el proceso de apagado “Grande Aqua”.	149
Figura 87 Evolución de las temperaturas durante el proceso de inmersión breve.	149
Figura 88 Evolución de las temperaturas de apagado para diferentes ratio de agua/cal.	150
Figura 89 Difractograma de las muestras de cal Z2 y Z3 previamente secadas en atm. N_2 .	151
Figura 90 Difractograma de la muestra Z4 se observan picos de cal viva y periclase.	151
Figura 91 Difractograma de la muestra Z1 apagada en laboratorio con una relación cal/agua en peso de 2 (Z 2-1) y 5 (Z 5-1).	151
Figura 92 Curvas de distribución de tamaños de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone.	152
Figura 93 Curvas de distribución de tamaños de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone (Z4 agregada).	153
Figura 94 Curvas de distribución de tamaños de partículas para las muestras apagadas en laboratorio.	153
Figura 95 Z3 vs apagadas en laboratorio.	154
Figura 96 Curvas de pérdida de masa frente a la temperatura de las pastas de cal Z2 y Z3.	155
Figura 97 Resultados de las medidas de viscosidad. La muestra EQ corresponde a una cal caliza en pasta de 25 años de envejecimiento, la muestra AK corresponde a una cal caliza en pasta de 3 años de envejecimiento y la muestra P90 corresponde a una cal en polvo CL.	156
Figura 98 Resultados de la medida de viscosidad de la muestra Z3 a la edad de 3 años, conservada en laboratorio en inmersión de agua.	156
Figura 99 Microscopia de lámina fina del mineral calcinado habitualmente en Morón.	157
Figura 100 FRX Cal viva de Morón.	157
Figura 101 Difractograma correspondiente a la cal viva de Morón 2.	158
Figura 102 FRX Cal viva de Morón 2.	158

Figura 103 Apagado al aire en Gordillo's.	159
Figura 104 Balsa de apagado de Gordillo's.	160
Figura 105 Apagado de cal en laboratorio con diferentes relaciones agua/cal y medida continua de temperaturas.	161
Figura 106 Graficos temperatura tiempo correspondientes a los apagados en laboratorio de la cal de Morón 2.	162
Figura 107 Resultados de la distribución de tamaños de partículas de las distintas muestras de Cal de Morón 2 apagadas con diferentes proporciones de agua.	163
Figura 108 DRX de los productos hidratados en laboratorio de Cal de Morón 2.	164
Figura 109 Esquema del proceso de apagado continuo seguido en Unicmall.	165
Figura 110 Diferentes visiones del proceso de apagado Unicmall 1. A) <i>fonedor</i> , B) tamizado del <i>fonedor</i> al <i>batidor</i> , C) y D) <i>batidor</i> y bomba, E) transporte por bombeo, tamizado y vertido final en la balsa de envejecimiento F) vista aérea de las balsas de envejecimiento.	166
Figura 111 Diferentes visiones del proceso de apagado Unicmall 2. A) mezclador, B) transporte del mezclador cargado, tamizado y vertido final en la balsa de envejecimiento.	167
Figura 112 Temperaturas medidas en diferentes etapas del proceso de apagado "Unicmall 1"	169
Figura 113 Temperaturas medidas en diferentes etapas del proceso de apagado "Unicmall 2"	170
Figura 114 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 1.	172
Figura 115 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 2.	172
Figura 116 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 3.	173
Figura 117 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 4.	173
Figura 118 Resultados de la medida de la viscosidad de la muestra Unicmall 1 a la edad de 6 meses, conservada en laboratorio.	174
Figura 119 Apagado en laboratorio de cal de Unicmall con distintas proporciones de agua.	175
Figura 120 Gráficos de temperatura- tiempo correspondientes a los apagados en laboratorio de la cal Unicmall.	175
Figura 121 Distribución de tamaños de partículas para las diferentes cales Unicmall apagadas en laboratorio.	176
Figura 122 Figura extraída de "La guía práctica de la cal y el estuco" (38), coincidente básicamente con la balsa de apagado que Oriol García tiene en su taller de Barcelona.	177
Figura 123 Aportación de la cal viva a la balsa llena de agua de capazo en capazo.	178
Figura 124 Tamizado de los grapiers y los crudos.	178
Figura 125 Vista de la zona inferior a la balsa donde se produce el envejecimiento.	178
Figura 126 Medidas de temperaturas en el apagado 18/6/07 O. García.	179
Figura 127 Medidas de temperatura en un punto fijo, en el apagado 20/6/07 O. García.	180
Figura 128 Resultados de la distribución de tamaños de partículas de distintas muestras de cal de O. García apagadas en su balsa.	180
Figura 129 Muestra OG3, secada al aire. Se observan cristales de aragonito propios de la carbonatación de la muestra en el proceso de secado.	183
Figura 130 Muestra Sevilla, Muestra OG3, secada al aire. Se observan cristales de aragonito propios de la carbonatación de la muestra en el proceso de secado.	183
Figura 131 Muestra AKRA, secada en estufa. Se observan cristales de portlandia hexagonales junto a cristales micrométricos poco definidos.	183
Figura 132 Muestra Sevilla, secada en estufa. Se observa un aglomerado de partículas de varias morfologías y tamaños.	183
Figura 133 Microscopias correspondientes a una partícula de cal cálcica OG 24 meses, realizadas con SEM Jeol JSM-840 con EDAX del SCTUB, con recubrimiento de oro.	184
Figura 134 Visión polimórfica de la portlandita donde se observan distintos hábitos cristalinos.	185
Figura 135 Grumo de plaquetas nanométricas donde también se aprecian dos cristales tabulares submicrométricos.	186

Figura 136 Aglomerado de pequeñas plaquetas y pequeños cristales tabulares o fragmentos de ellos (A), y cristal micrométrico de portlandita tabular (B), donde se pueden apreciar los planos de exfoliación.	187
Figura 137 Plaquetas tabulares submicrométricas, apiladas en forma de castillo de naipes, y cristal prismático con planos de exfoliación muy marcados. También se observan cristales fibrosos de aragonito y partículas nanométricas de portlandita.	188
Figura 138 Cristal prismático de portlandita. Se aprecian los planos de exfoliación paralelos. Sobre la cara (001) se pueden ver pequeñas plaquetas adheridas por la misma cara, submicrométricas y también nanométricas.	189
Figura 139 Aglomerado de plaquetas submicrométricas dispuestas como castillo de naipes con reacción aparente entre bordes de cristales para conformar una estructura de neoformación.	189
Figura 140 Aglomerado de cristales polimórficos en estructura multidireccional.	190
Figura 141 Visión bimórfica de la portlandita, donde se observan dos grandes partículas de dimensiones similares si bien una corresponde a un único gran cristal tabular mientras la otra está formada por un aglomerado de plaquetas micrométricas y submicrométricas (imagen inferior).	191
Figura 142 Aglomerado de cristales de portlandita, básicamente plaquetas y fragmentos de cristales tabulares, donde se aprecian (R) algunos cristales con bordes de reacción redondeados.	192
Figura 143 Diversas visiones de un gran aglomerado de plaquetas. Muestra una estructura de agregación de plaquetas tabulares considerablemente bien ordenadas, que podemos denominar de “escamas de pez”.	193
Figura 144 Gran cristal micrométrico de portlandita donde se observan las dislocaciones y las exfoliaciones.	194
Figura 145 Cristal micrométrico de portlandita exfoliada romboédricamente, y con plaquetas nanométricas asociadas.	195
Figura 146 Conglomerado de cristales prismáticos nanométricos orientados.	196
Figura 147 Gran partícula aglomerada formada por partículas subredondeadas, con bordes de reacción y de tamaños micrométricos, submicrométricos y nanométricos.	197
Figura 148 Aglomerados micrométricos de partículas mostrando bordes de reacción.	198
Figura 149 Aglomerados micrométricos de cristales alterados mostrando disoluciones y/o crecimientos cristalinos.	199
Figura 150 Detalle de la Figura 149 (inferior).	200
Figura 151 Cristal prismático central y otros pequeños cristales con un aspecto general de fracturas formadas inicialmente.	201
Figura 152 Partícula central (sin hábito cristalino concreto) y otros pequeños cristales, muchos de ellos de tipo lamelar, con un aspecto general de fracturas formadas inicialmente.	202
Figura 153 Estructura en “castillo de naipes” en un aglomerado de cal en polvo.	202
Figura 154 Evolución esquemática de un cristal prismático de portlandita	203
Figura 155 Evolución esquemática de un cristal tabular de portlandita	204
Figura 156 Estructura en "castillo de naipes".	204
Figura 157 Visión típica de una cal cálcica añeja en la que se dan laminaciones, fragmentaciones y bordes de reacción en los cristales prismáticos, con deposiciones, disoluciones y recrystalizaciones superficiales.	205
Figura 158 Equipo de medición de la viscosidad Brookfield DV-II utilizado.	206
Figura 159 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36% donde se muestran las medidas del esfuerzo cortante aplicado (Pa) para mantener la velocidad de rotación a lo largo del tiempo (s) en las distintas velocidades (r.p.m.)	209
Figura 160 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36%, donde se muestran los valores de esfuerzo cortante para cada velocidad y la curva de flujo ajustada	209

Figura 161 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36%, donde se muestran los valores de viscosidad para cada velocidad y la curva de viscosidad ajustada	209
Figura 162 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal AKRA en diferentes concentraciones.	210
Figura 163 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal Sevilla (Quílez) en diferentes concentraciones.	211
Figura 164 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal O.G. 24 en diferentes concentraciones.	212
Figura 165 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal O.G. 60 en diferentes concentraciones.	213
Figura 166 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para las pastas de cal Pachs, Ciaries y Calcasa.	214
Figura 167 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 36%. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η), para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.	215
Figura 168 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 38 %. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η), para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.	216
Figura 169 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 40 %. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η) para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.	217
Figura 170 Resultados de las medidas de viscosidad/tiempo en las concentraciones de cales añejas al 30%	219
Figura 171 Gráficos correspondientes a la medida de la viscosidad en cales en pasta añejas y pasta de cal antigua (Calcinor), normalizadas a una concentración del 30 %	220
Figura 172 Gráficos resumen de resultados de viscosidad correspondientes a la primera serie Pachs CL 90 S.	226
Figura 173 Evolución de la viscosidad en los primeros 30 días del grupo A y valores hasta 300 días (escala logarítmica) correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.	228
Figura 174 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días (escala logarítmica) de los cuatro grupos (A, B, C y D) correspondiente a la segunda serie Pachs CL 90 S.	229
Figura 175 Primeras determinaciones de viscosidad, posteriores a la lectura inicial $t=0$.	230
Figura 176 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días de cuatro cales comerciales españolas.	232
Figura 177 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días de las series B, C, D (Pachs CL 90 S) y la correspondiente a P80 (Pachs CL 80 S).	233
Figura 178 Equipo dispersor de alto rendimiento, de la marca IKA, modelo T 25 digital ULTRA-TURRAX®. El útil de dispersión utilizado es el S 25 N - 18 G.	235
Figura 179 Gráfico de resultados para las pastas de cal sin re-dispersión mecánica a los 0 y 7 días.	236
Figura 180 Gráfico de resultados para las pastas de cal aplicando las diferentes velocidades y tiempos de re-dispersión mecánica a los 0 días.	236

- Figura 181 Gráfico de resultados para las pastas de cal aplicando las diferentes velocidades y tiempos de re-dispersión mecánica a los 7 días. 237
- Figura 182 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm. 238
- Figura 183 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm, posteriormente a la aplicación de distintos tiempos de re-dispersión a 4000 rpm, a 0 y a 7 días. 239
- Figura 184 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm, posteriormente a la aplicación de distintos tiempos de re-dispersión a 12000 rpm, a 0 y a 7 días. 239

Tabla 1 Balance del CO ₂ generado-recuperado en distintos conglomerantes. Fuente (36).	44
Tabla 2 Cálculo del CO ₂ reabsorbido en procesos de carbonatación total de los conglomerantes utilizados.....	45
Tabla 3 Cálculo del balance de CO ₂ para 4 conglomerantes industriales.....	46
Tabla 4 Dosificaciones de morteros mixtos equivalentes a morteros de dos NHL comerciales.46	
Tabla 5 Balance kg CO ₂ / T mortero.	46
Tabla 6 Cuantificación agrupada por apartados de referencias que forman la bibliografía recogida en el proyecto “Lime Mortars & Plasters” del <i>The Getty Conservation Institute</i> . 55	
Tabla 7 Especificaciones ASTM (80) correspondientes a los tipos de cales hidratadas en polvo N y S.	76
Tabla 8 Valores de viscosidad de diferentes sustancias.	83
Tabla 9 Resultados FRX varias cales.	96
Tabla 10 Resultados FRX cales OG.	96
Tabla 11 Valores de las cales CL 90 S.	98
Tabla 12 Valores de las cales CL 80 S.	98
Tabla 13 Principales especificaciones técnicas del viscosímetro Viscotester 7L.....	104
Tabla 14 Gradientes de velocidad para distintos procesos.	105
Tabla 15 Resultados de DRX y granulometría láser correspondientes a 18 diferentes cales en pasta (CP) y pastas de cal (PC), producidas en España.....	132
Tabla 16 Valores medios de A[0001] para la pasta de cal y la cal en pasta de varias edades (55)	133
Tabla 17 Identificación de las muestras.....	144
Tabla 18 Valores de los cuantiles de los tamaños de partículas, de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone.	153
Tabla 19 Valores de los cuantiles de los tamaños de partículas, de las diferentes muestras apagadas en laboratorio.....	154
Tabla 20 Relación y codificación de las muestras ensayadas con concentraciones cercanas al 38%	208
Tabla 21 Relación y codificación de las muestras ensayadas con concentraciones al 30% ...	218
Tabla 22 Datos correspondientes a la medida de la viscosidad en cales en pasta añejas y pasta de cal antigua (Calcinor Calcasa). Todas las muestras normalizadas a una concentración del 30 %. Cada lectura corresponde a la media de los últimos 12 segundos.	220
Tabla 23 Codificación de muestras para la primera serie de medida de viscosidad.....	223
Tabla 24 Codificación de muestras para la segunda serie de medida de viscosidad	224
Tabla 25 Codificación de muestras para la segunda serie de medida de viscosidad en diferentes cales.	225
Tabla 26 Resumen de resultados de viscosidad correspondientes a la primera serie Pachs CL 90 S.	225
Tabla 27 Resumen de resultados de viscosidad de los grupos A, B, C y D, correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.....	227
Tabla 28 Incrementos de viscosidad de los grupos A, B, C y D, con respecto a la viscosidad en t = 0.....	229
Tabla 29 Incrementos de viscosidad de los grupos A, B, C y D, entre los 30 y los 90 días.....	230
Tabla 30 Resumen de resultados de viscosidad de los grupos A, B, C y D, correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.....	231
Tabla 31 Codificación de las muestras preparadas	234
Tabla 32 Resultados de los modelos ajustados para cada grupo de velocidades de re-dispersión	238

Agradecimientos

Esta tesis es fruto de años de trabajo de forma más o menos continuada, a lo largo de los cuales he podido compartir ilusiones, conocimientos y horas con muchas personas. A todas ellas quiero agradecer de forma genérica su colaboración y apoyo.

Primeramente quiero agradecer a mi familia Ana, Marta y Marc, por la paciencia y la comprensión que me han demostrado en muchos momentos. Lo cierto es que este trabajo me ha ocasionado momentos difíciles y me ha obligado a dedicarle un tiempo que les correspondía a ellos.

También quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. Inma Rodríguez Cantalapiedra y al Dr. Jaume Avellaneda por su dedicación como tutores de esta investigación. En este apartado quiero también incluir al amigo y tutor inicial del trabajo, Dr. Servando Chinchón.

Para distintos temas he podido disponer de la opinión experta de diferentes personas, a las cuales también quiero agradecer su predisposición y generosidad. Es el caso de los geólogos Dra. Antonia Navarro, profesora de la UPC, Dra. Eugenia Estop profesora de la UAB, así como al profesor Xavier Casanovas, por su visión crítica de la cal.

Siguiendo con las personas que han sufrido, disfrutado, soportado y colaborado con este trabajo, quiero mencionar a los amigos y amigas del Laboratori de Materials de la EPSEB, Montse Bosch, Joan Formosa, Laia Haurie, Joan Leiva, Joaquín Montón, Judith Ramírez y Marc Tous. También quiero recordar una larga lista de estudiantes que han dedicado una parte de su tiempo como becarios del Laboratori, de entre los que destaco a Alba Pérez por sus muchas horas midiendo viscosidades y Ruth Costa por sus estupendas traducciones.

A en Xavier i a na Montse pel seu “training” i a en Carlos, Ferran, Víctor i la resta d’amics, per ser-hi sempre.

A las empresas y artesanos vinculados con la cal por su colaboración facilitando materiales para las campañas experimentales y compartiendo información, a menudo “información reservada”. De entre los artesanos quisiera destacar al amigo Oriol García, estucador de Barcelona, quien siempre se ha mostrado dispuesto a una buena charla sobre la cal, y por su gran labor, de muchos años, de difusión de la cal y sus técnicas.

También quisiera destacar a Emilio Quílez y a Miguel Méndez (Cumén), ambos ya fallecidos, que me han ayudado a construir la imagen del mundo de la cal, con visiones muy antagónicas.

En esta misma línea quisiera destacar a la empresa Cales de Pachs, y a las personas que la componen. Quisiera agradecer a Valentí y Xavi Graner por todas las facilidades que nos han dado siempre y por un magnífico viaje a Saint Astier a lo largo del cual pudimos intercambiar mucha información. También a Ana Salamé, Francesc Piñol y Marius Serdà que también han contribuido a este trabajo.

A las personas y a las empresas fabricantes de cal y de morteros de cal que me han facilitado material y algunos datos como Unicmall, Calcasa, Caplansa, Ciaries, Tudela-Veguín, Chaux de Saint Astier, Parex, Íñigo Menchacatorre (Naturcal), Mapei y Biocalce.

A los amigos de Morón de la Frontera, por su cal y por su amor a la cal.

A todos los amigos “enfermos de cal”, especialmente a Andrea Rattazzi y al Forum Italiano Calce, a Joan Mestre y al Foro Ibérico de la Cal.

Gracias a algunas alumnas y alumnos con los que he aprendido mucho. De entre todos quiero destacar a un grupo fantástico a los que he tenido el privilegio de dirigir sus proyectos final de carrera relacionados con la cal y sus morteros. Son Francisco Pérez, Santi Riera y Miquel Angelo Gonçalves, Roser Puchol y Pilar Peñaranda.

En estas líneas no pueden faltar Remei García y el equipo de personas de la Biblioteca de la EPSEB, UPC, por la ayuda que siempre me han prestado, por su predisposición permanente y su amabilidad.

A los diferentes servicios técnicos de la Universitat d'Alacant (UA), la Universitat de Barcelona (UB) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), que me han permitido disponer de sus equipos científicos, sin los cuales este trabajo no hubiera existido.

Por último quiero agradecer a todos los autores de diferentes artículos científicos y otras publicaciones por poner el conocimiento al alcance de todos nosotros, de forma absolutamente generosa y a la Universidad Pública, por existir.

Resumen

La cal, que había sido el material conglomerante por excelencia en el sector de la construcción se ha visto relegada casi exclusivamente, a partir de la irrupción generalizada del cemento, al mundo de la restauración, donde todavía perduran profesionales y artesanos con oficio. Estos profesionales de la restauración valoran especialmente la trabajabilidad de la cal en estado fresco, y consideran que una cal en pasta envejecida tradicionalmente ofrece mejores prestaciones que una cal en pasta coetánea o que una cal en polvo. Esta mejor trabajabilidad se traduce en mayor viscosidad.

El motivo de esta tesis es investigar en la caracterización a nivel microscópico de las cales y en el comportamiento deformacional en estado fresco, para así poder confrontar el conocimiento tradicional desde la investigación científica. Al mismo tiempo, una segunda línea de investigación se ha centrado en verificar la aplicabilidad de distintas herramientas de medida para caracterizar las pastas de cal y las cales en pasta.

Para la realización de esta tesis se han escogido algunas de las diferentes cales disponibles en el mercado y que pueden servir de ejemplo de las distintas maneras de fabricar y de producir este material y se han estudiado: la caracterización de las partículas que componen las pastas de cal mediante la granulometría láser, la Difracción de Rayos X (DRX) y la microscopia electrónica; y también se ha estudiado el comportamiento deformacional de las cales a partir de la medida de la viscosidad.

Otra parte importante de la investigación realizada se ha centrado en discernir cómo evolucionan las pastas de cal en el tiempo y tras procesos de agitación.

Los resultados obtenidos de estos trabajos demuestran la aplicabilidad de la técnica de la granulometría láser y la medida de la viscosidad como herramientas válidas para caracterizar las cales, mientras que se demuestra que el parámetro $A_{[0001]}$ obtenido a partir de la DRX no es válido para datar la antigüedad de la cal en pasta.

También ha quedado demostrada la capacidad que tienen las cales en polvo de evolucionar incrementando su viscosidad y su carácter tixotrópico tras breves períodos de estacionamiento en forma de pasta de cal.

En cuanto a las cualidades de las cales en pasta envejecidas tradicionalmente, se ha constatado que éstas presentan, en general, mayores viscosidades y distribuciones de tamaños de partículas menores que las de las pastas de cal.

La evolución del proceso de envejecimiento de una cal en pasta no conduce siempre e indefinidamente a resultados mejores. Por tanto, no siempre una cal en pasta envejecida y de más edad es mejor que una cal más joven.

Abstract

Since the widespread irruption of the cement, the lime, which once had been the binding material par excellence in the construction sector, has been relegated almost exclusively to the world of restoration works, where skilled professionals and craftsmen still endure. These professionals especially appreciate the workability of fresh lime, and consider that a traditionally aged lime putty provides better performance either than a coetaneous lime putty or a powder lime. This better workability results into higher viscosity.

The purpose of this thesis is to investigate the characterization of the limes at a microscopic level and the deformational behavior in fresh state, in order to be able to confront traditional knowledge with scientific research. At once, a second line of research has focused on verifying the applicability of various measurement tools to characterize lime putties and hydrated lime putties.

In order to achieve the fulfillment of this thesis, some different limes available in the market, that could serve as an example of the various ways of manufacturing and producing this material, have been choosen. Right after, the following items have been studied: characterization using laser granulometry of the particles that make up lime, X-Ray Diffraction (XRD) and scanning electron microscopy; deformational behavior of limes after the measurement of viscosity has also been studied.

Another important part of the research performed has focused on to discern how hydrated lime putties evolve in time and after stirring processes. The results of these works demonstrate that laser granulometry techniques and viscosity measurements can be applied as valid tools to characterize limes, whereas it is concluded that $A_{[0001]}$ parameter obtained from XRD is not valid to reckon the age of lime putty.

The ability of powder lime to evolve increasing its viscosity and its thixotropic character after short periods of ageing in lime putty format has also been demonstrated.

Regarding the qualities of traditionally aged limes putties, it has been stablished that they exhibit generally higher viscosities and smaller size particle distributions than hydrated lime putties.

The evolution of lime putty aging process does not lead to better results, neither always nor indefinitely. Therefore, an aged lime putty is not necessarily better than a less aged lime.

Palabras clave

Español: cal, cal en pasta, pasta de cal, caracterización, tamaño de partícula, reología, viscosidad.

English: Lime, lime putty, hydrated lime putty, characterization, particle size, rheology, viscosity.

1 Motivación y objetivos

Esta tesis doctoral es fruto de una trayectoria profesional de más de 25 años vinculada al mundo de la arquitectura y de la investigación en materiales de construcción. Como profesional y como profesor de la Universitat Politècnica de Catalunya desde el año 1985 he desarrollado y mantenido una intensa relación con los planteamientos experimentales y el desarrollo de materiales de construcción a partir de mi vinculación con el Laboratori de Materials de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, del que soy responsable desde el año 1991.

El Laboratori de Materials de la EPSEB, creado para dar servicio a las necesidades docentes del centro, adquirió, a partir de la entrada en vigor del Decret 375/88 GC de Control de Calidad en la Edificación y el Real Decreto 1230/1989, en el que se aprobaban las disposiciones reguladoras generales para la acreditación de Laboratorios de Ensayo para el Control de Calidad de la Edificación, una nueva dimensión que permitió ampliar sus funciones con la transferencia de tecnología y la

investigación en materiales, centradas inicialmente en buena medida en el control de calidad del hormigón.

A partir del problema derivado del uso de cemento aluminoso en edificios construidos y de la alarma ocasionada con el derrumbamiento de un forjado en el barrio del Turó de la Peira (Barcelona, 1990), el Laboratori empezó a desarrollar una línea específica de investigación en técnicas y herramientas de diagnosis en edificación y en estudios de patología de la construcción que perduran hasta el día de hoy. De los trabajos realizados a lo largo de estos años se han derivado diversas publicaciones sobre diagnosis y patología en la edificación¹.

Estos trabajos de patología en los edificios y de diagnosis de los problemas relacionados con los materiales de construcción, me han permitido comprobar que, cada vez más, se hace necesario el desarrollo de soluciones adecuadas y compatibles con lo existente que identifiquen aquello que les ocurre a los edificios y, sobretodo, den respuesta a cómo se debe intervenir. En esta línea empecé a trabajar en el desarrollo de materiales, y específicamente en el mundo de los conglomerantes, tanto para obra nueva (con una larga labor en el desarrollo de pavimentos continuos² y morteros magnesianos³ en colaboración con la industria), como para restauración e

1

- Rosell J.R., Jordana F., Morla J.C., **Corrosió per carbonatació**; Ed. COAATB; Barcelona 1988; ISBN 84-87104-00-2
- Rosell, J.R., Casanovas X.; **Criterios de intervención en forjados de viguetes de cemento aluminoso**; Informes de la construcción, vol. 0, núm. 422, págs. 5-13; 1992
- Casanovas, X.; Rosell, J.R.; **Actuaciones de urgencia, recomendaciones de uso y posibles soluciones**; Jornadas sobre cemento aluminoso Universidad Politécnica de Valencia; 1994; ISBN 84-7721-232-5
- Casanovas X., Graus R., Rosell J.R.; **Manual de diagnosi i intervenció en sostres unidireccionals de formigó i ceràmics**; Ed. COAATB; Barcelona 1993; ISBN 84-87104-17-7
- Casanovas X et al.; **Manual de diagnosi i intervenció en sistemes estructurals de parets de càrrega**; Ed. COAATB; Barcelona 1995; ISBN 84-87104-23-1
- Rosell, J.R.; Monton, J.; **Una metodología de inspección de forjados de vigas de madera**; ADIGSA. 1r. Congrès. El cas dels sostres: experiències i perspectives; VCA Editors 1995
- Genescà J.M., Rosell J.R.; **Recomanacions per al reconeixement, la diagnosi i la teràpia d'estructures de fàbrica de maó**; Ed. ITEC; Barcelona 1997; ISBN 84-7853-317-6
- Genescà J.M., Rosell J.R., Gibert V.; **Recomanacions per al reconeixement i la diagnosi d'estructures de formigó armat que suporten estructures de fàbrica de maó**; Ed. ITEC; Barcelona 1999; ISBN 84-7853-357-5
- Bellmunt et al.; **Manual de diagnosis e intervención en estructuras de hormigón armado**; Ed. COAATB; Barcelona 2000; ISBN 84-87104-43-6
- Monton, J.; Rosell, J.R.; **Revisión crítica de las metodologías de diagnosis de forjados de vigas de madera**; 1º Conferencia Regional Euromediterránea. Arquitectura Tradicional Mediterránea. Presente y Futuro. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. 2007. ISBN 84-87104-79-7

2

- P200303007; Revestimiento continuo decorativo**; Pavindos S.A.; Rosell, J.R., Pérea-Ansalas J.; 2003
- P 200401715; Nuevo procedimiento mejorado para la ejecución de un pavimento continuo realizado in situ**; Inyetpavi S.L.; Rosell, J.R., Pérea-Ansalas J.; 2004
- Rosell, J.R.; Estrany, F.; **Estudio de nuevas formulaciones del cemento Sorel**; Ingeniería química, núm. 446, págs. 116-129; 2007

3

- P 20060164; UTILIZACIÓN DE COMPUESTOS DE MAGNESIO DE BAJO CONTENIDO EN LA FORMULACION DE MORTEROS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO**; Magna S.A.; Rosell J.R., Formosa J., Chimenos J.; 2006

intervención en edificios existentes. En este último campo se muestra especialmente relevante el uso de *grouts* y morteros. A menudo recibimos consultas relacionadas con la caracterización de los morteros existentes en edificios monumentales, para poder determinar de qué materiales están hechos, con qué dosificaciones y cómo se pueden reproducir a partir de las técnicas y los materiales actuales disponibles en el mercado. La necesidad de encontrar un mortero adecuado y compatible con los existentes nos ha permitido trabajar en dos direcciones: el diseño de morteros “a medida” cuando el edificio o las exigencias proyectuales así lo demandan, o la investigación del mercado de productos para detectar aquellos que mejor se adecuen a las necesidades concretas de cada intervención.

Para este tipo de estudios de las propiedades y prestaciones de los materiales, es imprescindible tener una visión pluridisciplinar de los problemas complejos que permita solucionarlos desde distintas áreas de conocimiento, ya que es entre las fronteras de las distintas disciplinas desde donde surgen, a menudo, las innovaciones.

En el caso de los materiales de la construcción, además del punto de vista de la arquitectura y la ingeniería en edificación, se hace cada día más imprescindible, la incorporación de la física, la química, la geología y la ingeniería de procesos que complementen las investigaciones que se desarrollan. Así sucede, precisamente, en el Laboratori de Materials que dirijo, donde colaboran arquitectos, arquitectos técnicos, geólogos, químicos, físicos e ingenieros. En el Laboratori también se han formado algunos estudiantes que han realizado sus trabajos de investigación en el campo de la identificación de morteros históricos y en el desarrollo de nuevas dosificaciones de morteros compatibles a partir de materiales disponibles en el mercado (1) (2) (3), o al estudio de las propiedades de morteros con cal actualmente comercializados (4).

De la experiencia realizada durante estos años, cabe destacar el punto de inflexión que significó, en su momento, el planteamiento de intentar estandarizar un mortero base (de cal aérea, puzolanas, aditivos y filler) que permitiese añadir, en obra, los colorantes y áridos gruesos (típicamente locales) adecuados para dar el tono, aspecto y textura del mortero nuevo similar al mortero histórico que se pretendía reproducir. El desarrollo de este mortero base se materializó en una patente UPC (5), y el proyecto fue presentado con éxito en el Salón CONSTRUMAT 07 en la Jornada Técnica organizada por la Asociación Nacional de fabricantes de Cal y Derivados (ANCADE) y en la *1^o Conferencia Regional Euromediterránea. Arquitectura Tradicional*

-
- Formosa, J.; Haurie, L.; Chimenos, J.; Lacasta, A.M; Rosell, J.; **Comparative Study of Magnesium By-Products and Vermiculite Formulations to obtain Fire Resistant Mortars**; Materials science forum, vol. 587-588, págs. 898-902; 2008
 - Formosa, J.; Aranda, M.; Chimenos, J.; Rosell, J.; Fernandez, A.; Gines, O.; **Chemically bonded cements formulated with by-products of magnesium oxide**; Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 47, núm. 5, págs. 293-297; 2008
 - Gines, O.; Chimenos, J.; Vizcarro, A.; Formosa, J.; Rosell, J.; **Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations**; Journal of hazardous materials, vol. 169, núm. 1-3, págs. 643-650; 2009
 - Formosa, J.; Chimenos, J.; Lacasta, A.M; Haurie, L.; Rosell, J.R.; **Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products**; Cement and concrete research, vol. 41, núm. 2, págs. 191-196; 2011

Mediterránea. Presente y Futuro (6) (Anexo 1), además de convertirse en el argumento principal de mi Proyecto de Tesis, defendido el año 2007.

También ha sido determinante la transferencia de tecnología y la intervención en obras reales dado que, a menudo, nos hemos encontrado con materiales correctamente planteados desde el laboratorio que colisionaban con la realidad en el momento de su puesta en obra, ya que durante ésta, se alteraba el diseño del material. Sirvan como ejemplo, el desarrollo de un mortero drenante para una empresa industrial, los que se diseñaron para restaurar el puente medieval de La Margineda (Andorra) o las intervenciones de restauración en Sant Pere de Rodes en Girona (Figura 1).



Figura 1 Pruebas de color en los morteros de restauración de la Torre de defensa del Monasteri de Sant Pere de Rodes (Girona).

Con todo lo aprendido durante estos años de recorrido he podido comprobar la importancia de conocer la cal, sus características y su comportamiento reológico, y por todo ello, mi proceso particular me ha llevado a centrar mi investigación en las cales nuevas y envejecidas, en pasta, en polvo y en su comportamiento en fresco como factores fundamentales de sus prestaciones en los morteros en cuanto a conocer la demanda de agua, la retracción, la viscosidad y la adherencia al soporte.

No quiero dejar de destacar que, durante mi trayectoria profesional también he tenido oportunidad de relacionarme con los distintos actores que intervienen en los procesos constructivos, lo que me ha permitido acercarme a los distintos puntos de vista y a las diversas maneras y lenguajes que tienen para exponer sus demandas o preocupaciones. Así, han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis las conversaciones mantenidas con arquitectos restauradores, técnicos responsables de la conservación del patrimonio arquitectónico, los productores industriales de morteros y aditivos, los fabricantes artesanales de la cal por métodos tradicionales, y también los artesanos, estucadores, albañiles, encargados de obra y empresas constructoras que participan en los distintos procesos. Y también he podido participar en grupos de trabajo⁴ y establecer una red⁵ de “enfermos de la cal” entre profesores universitarios e investigadores de distintas escuelas que ha servido, sin duda, para acabar de proporcionarme los fundamentos que me han permitido construir un discurso propio.

Objetivos.

Los objetivos de esta tesis tienen que ver, por lo tanto, con todo este conocimiento previamente adquirido y con las inquietudes que como profesional y como investigador de la universidad se han ido presentando y que pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Desde la óptica tradicional, en la que la cal provenía necesariamente de una producción cercana al consumo y también desde la óptica industrial moderna, es evidente que un producto que proviene de materias primas diversas y producido con distintos medios presentará una cierta variabilidad que, en algunos casos, puede ser enorme. Así no tiene sentido hablar científicamente de la cal de manera general sino más bien de las distintas cales existentes. Es objetivo de este trabajo **estudiar las características en estado fresco de diversas cales, de procedencias españolas y fabricadas con distintos procesos, desde los más tradicionales hasta los más industrializados.**
- Existe una aparente discrepancia entre la realidad de la producción del sector industrial origen de las cales mayoritariamente utilizadas en el sector de la construcción (cales en polvo o morteros predosificados de cal o con cal) frente a las recomendaciones y saberes de los usuarios “tradicionalistas” de la cal, que valoran el envejecimiento en pasta de la cal ya que alegan que este proceso le proporciona mejores cualidades. También es opinión generalizada de los aplicadores (restauradores, estucadores y albañiles tradicionales), que la trabajabilidad de las pastas y los morteros, sus resistencias y sus velocidades de fraguado y endurecimiento son distintas si la cal ha sido apagada en balsa y envejecida en pasta o, si por el contrario, ha sido apagada con métodos industriales. Ante esta disyuntiva, se plantea como objetivo **constatar si el**

⁴ Forum Italiano Calce es un punto de encuentro para todos los que estudian, producen y utilizan la cal en la arquitectura y la restauración. Fundado en 2007 fruto de la pasión de un reducido grupo de “amantes” de la cal, es hoy un reconocido punto de referencia internacional para los temas de su especialidad.

⁵ FICAL. Foro Ibérico de la Cal. es una asociación sin ánimo de lucro cuyo fin es el desarrollo de la investigación, la formación y la difusión de la producción y el uso de la cal en la arquitectura.

envejecimiento en balsa de la cal en pasta siempre mejora sus prestaciones, entendidas como la variación de su nanoestructura y su comportamiento reológico.

- Las actuales exigencias del sector industrial y del de la edificación en particular, definen un panorama normativo, de especificaciones técnicas y de certificados de calidad y garantías que comportan inevitablemente una revisión de las herramientas que, a día de hoy, se han estado utilizando para el análisis de la cal. Por ello se plantea como objetivo de esta tesis, **constatar la aplicabilidad de diferentes técnicas analíticas como la DRX, la granulometría láser y la medida de la viscosidad, como herramientas de medida de la calidad de la cal en estado fresco.**
- Más allá de las cuestiones muy especializadas de técnica de ensayo o de procesos de transformaciones micro y nanométricas, es evidente que tenemos el interés de concretar los conocimientos adquiridos sobre las cales en instrucciones prácticas de fácil aplicación al mundo de la construcción de la arquitectura. En este sentido es también objetivo de esta tesis dar respuesta a cuatro preguntas clave:

¿se puede mejorar la trabajabilidad de la pasta de cal a partir de procesos de agitación?

a partir de una cal en polvo ¿es posible conseguir una pasta de “buenas” características?

¿influye el apagado artesanal o semi-industrial en las prestaciones de las cales en pasta?

y en definitiva ¿es mejor la cal en pasta que la pasta de cal?

2 Introducción

2.1 Conglomerante tradicional

El hecho de construir se basa en disponer de elementos y materiales, a menudo con intención arquitectónica. Cuando con esta adjunción se busca un comportamiento más o menos monolítico del conjunto es necesario utilizar materiales (o elementos) con capacidad de aglomerar.

Sin duda el aglomerante más universal y más sencillo de obtener (si se da en el lugar) es la arcilla. Las fuerzas de adhesión entre las partículas de arcilla se deben a mecanismos exclusivamente físicos, muy relacionados con la forma laminar de las partículas y con los procesos de ordenación y fijación entre partículas como consecuencia de la tensión superficial producida durante el secado.

El otro gran grupo de materiales con capacidad para unir fragmentos son aquellos que deben su función a un cambio químico. Son los conglomerantes tradicionales, el yeso y la cal, hasta los modernos cementos naturales y cementos portland⁶. Estos conglomerantes se obtienen por cocción de rocas, más o menos seleccionadas, a temperaturas que oscilan de los 150-200°C para los yesos hasta los 1300-1400°C para los cementos artificiales.

Los procesos de producción pueden llegar a ser enormemente sencillos y, consecuentemente, poco eficientes. A título de ejemplo se reproduce (Figura 2) una figura correspondiente a una calera precolombina (7), que en esencia coincide con las explicaciones dadas en 2010 al autor de esta tesis, por un calero haitiano que seguía

⁶ En esta visión general y necesariamente simple se están omitiendo multitud de diferentes aglomerantes, como las breas, los asfaltos, o conglomerantes como el cemento aluminoso, los cementos de magnesio, etc.

produciendo pequeñas cochuras de cal con este procedimiento. Como puede observarse se trata de una gran pira de leña coronada por una pequeña cantidad de piedra caliza a cocer.

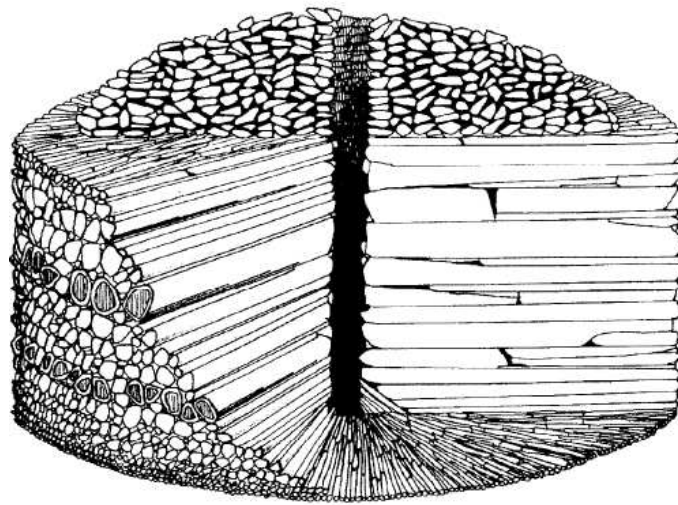


Figura 2 Calera tradicional redonda de Yucatán y Campeche (7).

La cocción tradicional de los yesos y las cales en hornos, sigue unos esquemas similares (8) (9). Se basa en una cierta instalación fija, consistente en unos muros perimetrales o en una excavación realizada en un terreno ataludado, en los que se construyen una o varias bóvedas con la propia piedra a cocer, y que son “cargados” con más piedra del mismo tipo. Por la o las boqueras delanteras se va suministrando combustible vegetal hasta la cocción del mineral (Figura 3).



Figura 3 Diversas ilustraciones que muestran la cocción tradicional del yeso en Albarracín (Teruel) (8).

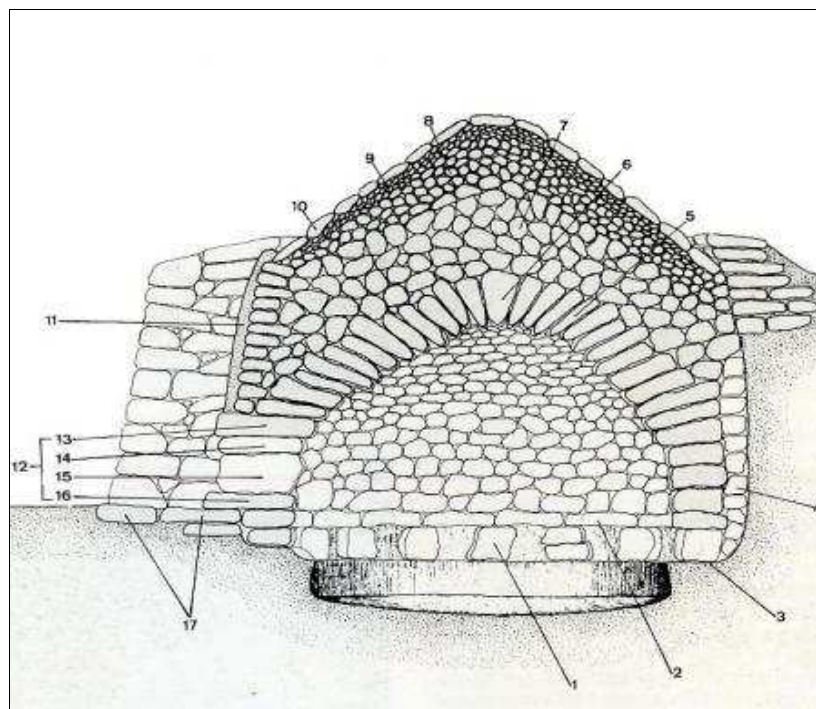


Figura 4 Figura correspondiente a la reconstrucción gráfica realizada en 1987 de la sección de un horno tradicional de producción de cal en la comarca del Montsià en Cataluña (9).

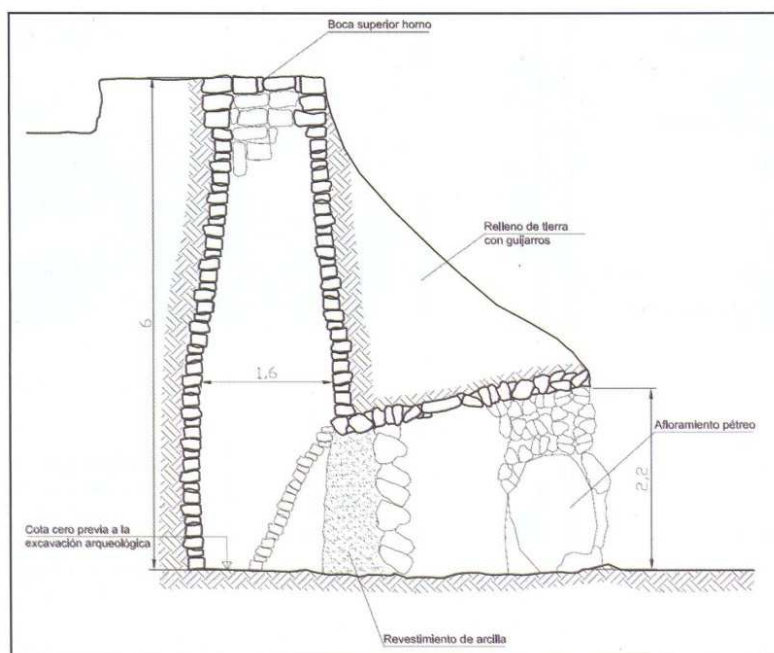


Figura 5 Sección correspondiente al levantamiento gráfico del "forn de raig" de Calders, Barcelona.

Las técnicas de producción preindustrial de la cal (Figura 4 y Figura 5) no permitían asegurar como resultado un producto de máxima pureza en óxido de calcio, sino al contrario, debemos pensar que casi nunca se lograba un producto exento completamente de propiedades hidráulicas y de elementos no calcinados.

El proceso de apagado por fusión, necesariamente muy largo, homogenizaba el producto consiguiendo hidratar el óxido de calcio independientemente de su "actividad", (la cual es función de la temperatura alcanzada por el mineral en el proceso de cocción) e hidratando los compuestos con capacidad hidráulica como los silicatos y los aluminatos cálcicos (consecuencia de la composición del mineral u otros).

Así el apagado en la balsa generaba un producto mezcla de hidróxido cálcico y carga mineral inerte. A menudo la calidad del producto se valoraba en función de la cantidad de agua que era capaz de "atrapar" en el apagado, o de la cantidad de arena que podía admitir para confeccionar un mortero (10). Otras formas de apagado (con menor cantidad de agua), con materias primas con mayor contenido de arcillas, y mayores temperaturas de cocción, proporcionaban productos de cal con propiedades hidráulicas, que actualmente conocemos como cales hidráulicas naturales.

El conocimiento "clásico" ya distinguía entre varias utilidades de los morteros de cal, donde hacían falta ciertas prestaciones. De hecho, lo que se convertía en un producto con propiedades de resistencia inicial elevada, o con capacidad de adormecimiento en ambientes saturados, etc. era el propio mortero. Estas propiedades se conseguían a partir de dosificaciones con materiales con puzolanidad latente como las puzolanas naturales o la chamota⁷ cerámica.

⁷ Chamota: Se trata del producto consecuencia de la trituración de ladrillos, tejas u otros materiales cerámicos cocidos a temperaturas no muy elevadas. Presentan propiedades puzolánicas.

Las actuales técnicas de análisis permiten identificar estos componentes en los morteros históricos (11) (12) (13) (14) (15) (16).

Hay una muy amplia bibliografía (17) en la que se muestran estudios realizados en edificios monumentales y que han puesto de manifiesto la complejidad de los “aparentemente sencillos” morteros tradicionales. Por otra parte, también se observa al recorrer esta documentación la diversidad de técnicas de análisis empleadas y la naturaleza de la información que se obtiene.

Sin embargo, y pese a este esplendoroso pasado, el uso de la cal en la construcción se fue reduciendo y ciertamente el material evolucionó hacia compuestos hidráulicos, que en principio fueron cales hidráulicas y cementos naturales (18), para desembocar en los cementos artificiales, de los cuales el máximo exponente actual es el cemento Portland.

En la geografía que nos es más cercana, los propios fabricantes tradicionales de cal se “reconvirtieron” en fabricantes de cemento, ese nuevo material “de extraordinarias prestaciones de resistencia”, también a cortas edades. (19) (20)

Actualmente perduran productores de cal aérea con pequeñas instalaciones artesanales, con escaso futuro a mi modo de ver, al mismo tiempo que existen las grandes industrias pertenecientes a grupos nacionales o transnacionales, que producen cal para distintos sectores.

Guillermo Coloma (21), escribe:

“Hasta antes del rápido crecimiento de la minería y la industria química en el siglo XX, el óxido de calcio (cal) fue utilizado casi en su totalidad como un material para la agricultura y la construcción.... Universalmente, hasta el año 1900 el óxido de calcio (cal) era usado exclusivamente en construcción y agricultura. Hoy en día, más del 95% de éste, se utiliza en procesos químicos industriales y en faenas mineras, como un reactivo industrial alcalinizante, purificante de metales, absorbente, neutralizante, coagulante y acondicionante, entre otros”.

2.2 De la piedra a la piedra.

Seguidamente, y de forma sintética, se exponen las reacciones y los productos que se forman en las diferentes fases de obtención, apagado y fraguado de la cal (Figura 6).

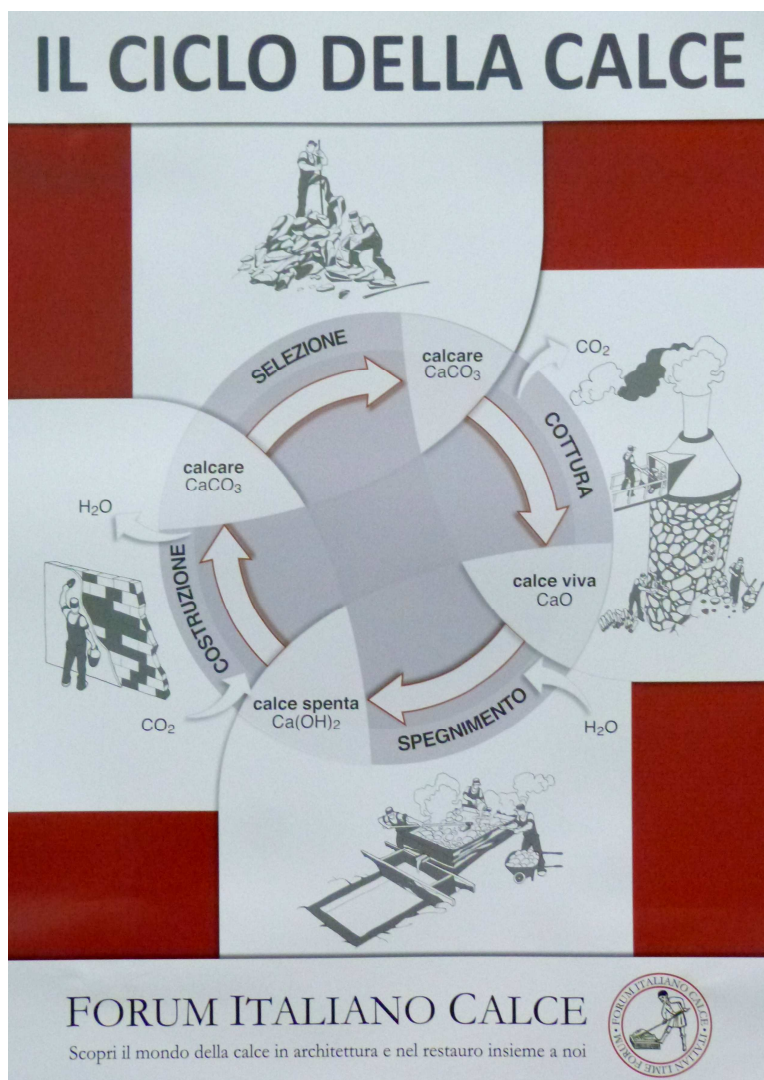
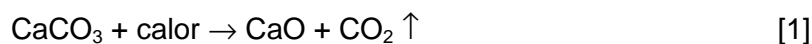


Figura 6 Representación ilustrada del ciclo de la cal.

La cal aérea se obtiene de la calcinación de la piedra caliza. Ésta puede estar formada por varios elementos pero, simplificando, hay un contenido importante de carbonato cálcico.

La temperatura de cocción debe superar los 850 °C y no suele alcanzar los 1200 °C



Al producto obtenido lo conocemos como óxido de calcio, cal viva, cal en terrones, y en química de los conglomerantes se representa por "C".

Es preciso hidratar este producto para formar el conglomerante.



Así se obtiene el hidróxido de cal, la cal apagada, y en química de los conglomerantes se representa por "CH".

Si la cantidad de agua ha sido la justa para la hidratación, el producto es en polvo y si tiene exceso de agua el producto es en pasta. Si se desea obtener cal apagada en polvo se debe utilizar en el apagado una cantidad de agua superior a la estequiométrica dado que una parte de ésta se pierde en forma de vapor como consecuencia de la exotermia de la reacción.

Una vez mezclada la cal a un árido y con la aportación de agua, si es precisa, se obtiene un mortero húmedo. Lo primero que sucede después del secado es el endurecimiento del mortero originando el primer incremento de resistencia a través de la gelificación: es decir, se gana una cohesión limitada como resultado de las fuerzas de tensión superficial entre el agua y las superficies del material y no de una reacción de conversión química. Este proceso viene acompañado de una cierta retracción, al tiempo que comienza la reacción de carbonatación del hidróxido cálcico con el dióxido de carbono de la atmósfera, para rehacer, en cierta forma, la roca original de carbonato cálcico.



La aparente simplicidad del proceso esconde multitud de variables que hay que conocer y entender.

La materia prima no es simplemente CaCO_3 . Habitualmente la cal se fabricaba cercana a las obras, y por tanto, la materia prima para la cocción era la propia del lugar. *"En cada sitio se hace la cal posible"*. Esto quiere decir que en determinados casos habrá dolomías (carbonato doble de calcio y magnesio) que aportarán óxido de magnesio (haciendo que la cal sea más magra o más grasa), y en otros, la roca caliza contendrá elementos de cuarzo intrínseco a su formación metamórfica o bien se encontrará mezclada con arcillas, que aportarán en la cocción (en función de la temperatura) silicio y aluminio reactivos, etc.

Otra variable importante del proceso es la temperatura. La tecnología tradicional no permitía temperaturas constantes e idénticas para todas las partículas de materia prima. El calor se transmite de la superficie del mineral hacia el interior en un proceso que tiene una cierta inercia, por lo que el tamaño de la roca con el que se cargaba el horno era determinante junto con la propia tecnología constructiva de la bóveda y chimeneas del horno. Del mismo modo, el tipo de leña, los días y noches que ardía, la longitud de llama y el control del tiraje del horno (tapando la puerta y cubriendo el caramullo con tierras), eran determinantes en las temperaturas alcanzadas.

El apagado mismo de la cal conlleva productos diferentes. Lógicamente habrá que vincular este proceso al resultado de la cocción y de las materias primas. Ya en los manuales tradicionales encontramos bastantes referencias a la importancia de la cantidad de agua a utilizar y al tiempo que debe pasar hasta su utilización. En algunas especificaciones se habla de cal apagada y envejecida a lo largo de varios años.

Pero también hay que conocer otros procesos de apagado, como los referidos a productos con propiedades hidráulicas, o las técnicas de morteros de cal en caliente, por citar algunos ejemplos (23) (24).

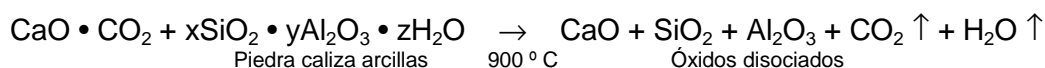
Finalmente el propio endurecimiento de las pastas y los morteros no se debe estudiar limitado al hidróxido cálcico en contacto con la atmósfera (presencia simultánea de humedad y CO₂), dado que, en determinadas circunstancias se dan reacciones de hidraulicidad y puzolanidad.

2.3 Hidraulicidad y puzolanidad.

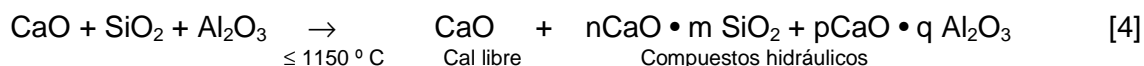
Una posible definición tradicional de hidraulicidad la centraríamos en la capacidad de fraguado del conglomerante en inmersión. Típicamente se define un conglomerante hidráulico como el que es capaz de “fraguar” en inmersión. (25)

El conglomerante con propiedades hidráulicas será aquel que conlleva en sí mismo los elementos capaces de reaccionar entre sí en presencia de agua, para formar nuevos compuestos “resistentes”.

Esta explicación, en tanto que cualitativa, permite un adjetivo cuantitativo. Así habrá un cierto continuo desde las cales aéreas puras, referidas en la expresión [1] anterior, y los conglomerantes, el fraguado de los cuales, es mayoritariamente hidráulico.



Aumentando la temperatura se forman nuevos compuestos hidráulicos:



La reducción, hasta prácticamente la desaparición, de la cal libre (el CaO) del segundo término de la expresión [4] anterior definirá lo que es un cemento moderno.

A principios del siglo XVIII, Vicat (18) definió el “Índice de hidraulicidad” [5], herramienta fundamental que permitió clasificar las cales y los cementos.

$$I = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} \quad [5]$$

Según la expresión [2] anterior, la cal libre hay que apagarla con una tecnología que emplee exclusivamente la cantidad de agua necesaria para transformarla en cal apagada en polvo. Y a partir de aquí se dispondrá de un conglomerante con fraguado hidráulico y aéreo.

La parte aérea endurecerá siguiendo [3], mientras que el fraguado hidráulico responderá:



Como ha quedado explicado, el endurecimiento aéreo consiste en la carbonatación de la cal apagada.

Pero si la cal aérea se mezcla con determinados elementos capaces de fijar el óxido de calcio, entonces se producen elementos muy similares a los resultantes de la reacción hidráulica. Estos elementos capaces de reaccionar con la cal son las puzolanas naturales, la chamota de determinados ladrillos u otras piezas cerámicas,

etc. Genéricamente conocidas por puzolanas y en terminología del cemento: adiciones activas.

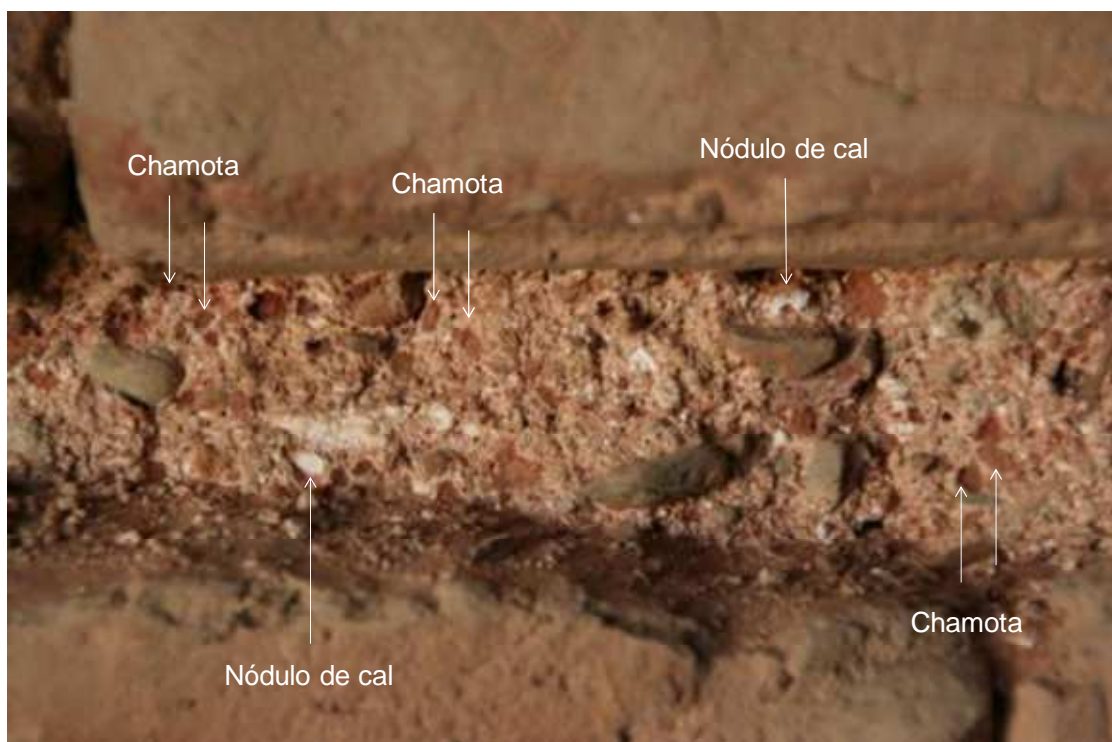


Figura 7 Mortero de junta de fábrica de albañilería donde se observan nódulos de cal y chamota de distintos tamaños. Alhambra de Granada.

La reacción del fraguado de las puzolanas con la cal se conoce como reacción de puzolanidad.

En los morteros tradicionales con cal aérea, se conseguía una clara mejora de prestaciones (mecánicas, de velocidad de fraguado, de capacidad de fraguado bajo el agua, de impermeabilidad, etc.) empleando elementos puzolánicos en la confección del mortero. Esta capacidad, aunque no formulada, era ya conocida desde el mundo clásico, y los estudios químicos de mediados del s. XVIII (18) permitieron iniciar el camino para entender muchos de estos procesos y desarrollar conglomerantes de más altas prestaciones a partir de la evolución de los cementos naturales. Son los antecedentes a la aparición del cemento portland.

La industria del cemento y las preferencias de los operarios han ido arrinconando la cal en la construcción hasta dejarla en la situación presente. Actualmente la cultura que hay en las obras (y en los proyectos) es la del cemento, de los morteros específicos y el hormigón, lo que ha provocado la casi total desaparición de la cal en las obras. El único reducto donde la encontramos es como componente de determinados morteros predosificados. Y la excepción a esta regla son las obras de restauración en los países “desarrollados”.

2.4 Fabricación e industria.

La práctica tradicional de la cal consiste en calcinar cal en pequeña escala, apagando secuencialmente la cal viva utilizando cantidades de agua mayores que las estequiométricas para producir pasta de cal (a veces reforzada con varios aditivos orgánicos e inorgánicos), y añadiendo a continuación muchos tipos de áridos para elaborar morteros. Adicionalmente, el envejecimiento de la pasta de cal almacenándola bajo el agua, o enterrándola bajo suelo húmedo o bajo un manto vegetal durante varios años, ha sido considerado por muchas fuentes históricas como esencial para ciertos tipos de aplicaciones (por ejemplo, revoques finos o trabajos de estucados) (26) (27) (28).

La cal viva era un producto que podía almacenarse si se conservaba al abrigo de la humedad. Para determinados usos, por ejemplo para “blanquear” en el sentido desinfectante del término, era común aplicar la lechada de cal recién apagada (cal caliente).

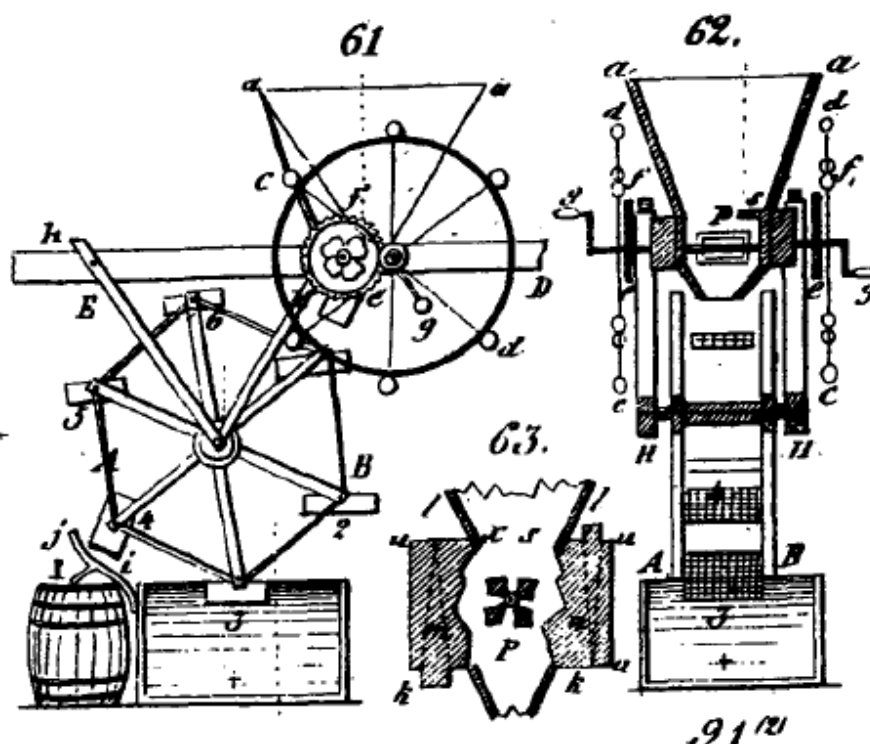


Figura 8 Figura de “máquina” para apagar la cal por inmersión y obtener cal hidratada en polvo, extraído de Espinosa, P.C. Manual de construcción de albañilería (29).

Desde los años 1920's, se dispone de cal apagada en un hidratador industrial, con una relación de agua frente cal viva algo superior a la estequiométrica, y que resulta en un producto seco. La cal hidratada en polvo resulta más fácilmente empaquetable y transportable para ser, posteriormente, mezclada in situ con agua para confeccionar la pasta y el mortero. A la hora de ser transportada, además, tiene la ventaja de ser mucho más ligera que la pasta de cal apagada. Es por ello que la cal comercial más frecuentemente utilizada actualmente en edificación y en intervenciones de conservación es la cal hidratada en polvo.

La industria actual ya tiene poco que ver con la tradicional. La cal es un producto industrial de muy amplio uso en distintos campos (21). Considérense sectores tan importantes como la metalurgia y en particular la siderurgia, el tratamiento de aguas, la agricultura, la industria química, la industria azucarera, la papelera, el medio ambiente, etc. A groso modo se considera que en España tan sólo el 10 % de la cal producida se usa en edificación. En el año 2009 se produjeron, en España, unas 215.000 T de cal hidratada sobre un total de 2.450.000 T de cal de todo tipo (30). La producción española que se comercializa⁸ se encuentra concentrada en menos de 20 fábricas y en unos pocos grupos industriales.

A pesar de ello es posible comprar en España cales en pasta provenientes de diferentes procesos de fabricación más artesanales.

Seguidamente se presentan tres industrias españolas actuales que producen cal para la construcción, así como el taller de un artesano que apaga cal para uso propio. Se han escogido por representar maneras diferentes de producir cal y porqué, con alguno de sus productos, entre otros, se ha desarrollado la parte experimental de este trabajo.

● Cales de Morón, Gordillo's

A pocos kilómetros del pueblo sevillano de Morón de la Frontera se encuentra la aldea de Caleras de la Sierra, donde se ubica un conjunto de antiguos y modernos hornos de cocción de cal. En esta zona se ha venido realizando la “cal de Morón” declarada recientemente Patrimonio Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO, bajo el título “Revitalización del Saber Tradicional de la Elaboración de la Cal Artesanal en Morón de la Frontera, Sevilla”. (31) Este conjunto explota desde hace siglos unas canteras de roca caliza adyacentes.

Uno de los pocos conjuntos de hornos de esta zona que sigue realizando cochuras tradicionales es el de la familia Gordillo. Esta industria familiar se fundó en 1874 y, hasta la fecha, sigue fabricando cal a partir de una cocción artesanal en hornos de tipo árabe, alimentados por combustible vegetal de olivo, pino, eucalipto, etc. Trabaja a partir de calcinaciones de hasta 30 toneladas/horno con un tiempo de cocción de aproximadamente dos semanas de forma ininterrumpida.

El propio sistema produce varios tipos de óxido en función de las temperaturas recibidas y la contaminación de contacto con las paredes y el caramullo del horno, cubiertos de un embarrado. Comercializan el propio óxido en forma de polvo o de terrones y la cal apagada, también en polvo y en pasta.

Al mismo tiempo están iniciando una línea de negocio con morteros preamasados y otros materiales de construcción de producción foránea.

La perduración de este sistema de producción se debe exclusivamente a la voluntad familiar y a algunas subvenciones públicas vinculadas al hecho cultural tradicional.

⁸ Existen procesos industriales (p.e. industria azucarera o papelera) que utilizan gran cantidad de cal y que pueden producir la cal exclusivamente para su consumo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 9 (a) Vista general de los hornos tradicionales, (b) interior del horno, en el proceso de construir la bóveda, (c) acopio exterior de biomasa para la cocción nocturna, (d) en la fase de cocción es necesario, de forma periódica, rehacer el caramullo que va descendiendo, (e) vista exterior del horno en combustión.

El apagado se realiza por el procedimiento tradicional conocido por “fusión” (Figura 104), aportando súbitamente gran cantidad de óxido a la balsa, lo que provoca un lento incremento de temperatura que no alcanza los 100 °C. La agitación es mecánica.

• Unicmall

Se trata de una empresa fabricante de cal desde 1960, situada en Felanitx, en la isla de Mallorca. Es la única empresa fabricante de cal industrial en la isla y de ahí su nombre.

Es un caso sorprendente, pues no se encuentra cercana a una cantera de roca caliza en explotación ni está próxima a una explotación de biomasa o de carbón. Calcinan roca caliza transportada desde Son Bugadelles, en Calvià, en un horno rotatorio alimentado por fuel y otros aceites. Y posteriormente apagan la cal viva semi-industrialmente y la envejecen en balsa, de forma tradicional.

Comercializan tanto la cal en terrones como la cal en pasta. También comercializan diferentes productos para el sector de la construcción como morteros preparados diversos y pinturas a la cal.

Actualmente ya no calcinan piedra. Se abastecen directamente de óxido de cal proveniente de la península.



Figura 10 Vista general de la fábrica. (www.Google 2011).

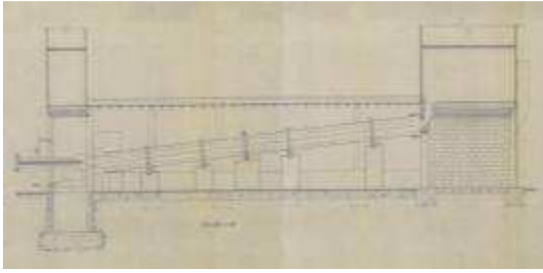


Figura 11 Esquema del horno rotatorio.



Figura 12 Vista de la zona del quemador del horno y el circuito de calentamiento del fuel.



Figura 13 Vista del apagador (*fonedor*).



Figura 14 Vista de las balsas de envejecimiento.

● Cales de Pachs

En Pachs del Penedès, (Barcelona) se encuentra desde la segunda década del siglo XX la empresa Cales de Pachs S.A. Actualmente se trata de una industria altamente tecnificada capaz de grandes producciones de cal en forma de óxido y de hidróxido en polvo. Aproximadamente entre el 10% y el 15% de su producción se encamina al sector de la construcción, en forma de hidróxido en polvo y de áridos, provenientes de los estériles de minería generados.

La instalación está dotada de dos hornos verticales de tecnología permanentemente actualizada, alimentados por áridos de la cantera adyacente o de otras canteras. El combustible utilizado es un micronizado de carbón o biomasa, y recientemente ha inaugurado una nueva instalación de apagadores automatizados para conseguir mejores y más diversas calidades de productos.

Cumple las exigentes normativas medioambientales y ha recibido algunos premios en este sentido (Premio finalista a los Príncipe Felipe, a la excelencia empresarial Edición 2009, en la modalidad “Eficiencia Energética y a las Energías Renovables”, Premio UEP (Unió Empresarial del Penedès) 2007 a la mejor iniciativa medioambiental del Penedès, y Premio MEDI AMBIENT 2008 a la mejor trayectoria encaminada a la mitigación del cambio climático) (32).



Figura 15 Vista general de la fábrica. (www.Google 2011)

● Oriol García, estucador

Oriol García es estucador profesional de quinta generación y un entusiasta de la cal y sus técnicas. Ha participado en multitud de cursos universitarios y profesionales, siempre impartiendo su conocimiento desde la experiencia personal y familiar, así como desde la tradición. Además siempre está dispuesto a un buen debate en torno a la cal.

La cal viva la compra en alguna de las modernas fábricas de la región (cales de Pachs, Ciaries, etc.), para posteriormente apagarla, para su uso particular, en su taller de Barcelona y raramente comercializa la cal en pasta. Una vez envejecida por períodos de duración mínima de 6 meses procede a preparar los morteros y las “pastas grasas” con los correspondientes colores para aplicar en estucos, esgrafiados, etc.

Los procesos de apagado y envejecimiento se describen con mayor detalle en 5.1.2.5 *Apagados realizados por Oriol García en Barcelona.*

2.5 Visión ambiental de la cal

¿Podemos considerar que la cal es un material de construcción medioambientalmente “verde”?

Existe, entre los productores y algunos usuarios de la cal, la consideración generalizada de que la cal es un producto sostenible para la construcción, mientras que otros quizás más prudentes, lo consideran más sostenible que el cemento (33). Una primera consideración en este sentido es debida a la captación de CO_2 que se produce durante el proceso de carbonatación, por el cual se recupera un mol de CO_2 por cada mol de Ca(OH)_2 , en una reacción inversa a la cocción original, ver [1] [3]. Otras consideraciones serían las menores temperaturas teóricas de calcinación (menor para la cal aérea y mayor para los cementos) y la proximidad de la producción con relación al usuario.

El problema reside en que para evaluar la posible sostenibilidad del material hay que utilizar herramientas “cuantitativas” como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que “evalúa, de forma sistemática los aspectos e impactos ambientales de los sistemas del producto, desde la adquisición de la materia prima hasta la disposición final” (34).

A partir de esta metodología podemos simplificar y definir, para la cal, las siguientes fases (35):

Para la obtención de la cal viva CaO [1]:

- Extracción y transporte de la materia prima (calcita o dolomita) hasta el centro de producción
- Clasificación y almacenamiento
- Primera molturación
- Cribado y clasificación
- Calcinación
- Refrigeración, inspección y cribado.

Y si se desea obtener cal apagada [2] además hay que:

- Volver a molturar y cribar
- Hidratar a presión con agua o vapor
- Moler
- Empaquetar, almacenar y distribuir.

Obviamente en las distintas etapas descritas se consume energía (barrenado para los explosivos en cantera, carga y transporte de las rocas, machacadora de mandíbulas, transportes diversos en fábrica, gestión del combustible, la propia calcinación, etc.) y se generan residuos (especialmente estériles de minería y CO_2). Las fases que consumen más energía y generan más CO_2 son los transportes (incluida la distribución del producto final) y mayormente la calcinación. Tampoco podemos olvidar el “coste” medioambiental de generación de la propia instalación fabril, con toneladas de acero en las estructuras, los silos, la maquinaria, toneladas de material refractario, otros materiales (cauchos, neoprenos, etc.) y componentes electrónicos, etc.

Si consultamos las guías ambientales existentes elaboradas por los organismos gubernamentales para la manufacturación de la cal y del cemento⁹, éstas comprenden diversos aspectos relacionados con los impactos específicos durante la manufactura, que incluyen:

- las emisiones aéreas (expulsión de gases por la combustión de recursos; emisiones de partículas sólidas durante la molturación y cribado de las materias primas, o las asociadas a los distintos sistemas de hornos, enfriadores del clínker o molinos; óxidos de nitrógeno generados por las altas temperaturas de combustión en los procesos en los hornos de cemento; dióxidos de azufre; los gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono CO₂, mayormente asociado al tipo de combustible que se usa, a la eficiencia energética de las instalaciones y a la descarbonatación de la roca calcárea (que en su estado puro significa el 44% de CO₂ en peso);
- el consumo de energía y combustibles en una industria como la de la producción de cemento y cal que se considera intensiva y que en costes puede significar entre el 40 y el 50% de los costes totales de producción.
- las aguas residuales, normalmente causadas durante los sistemas de refrigeración en las distintas fases del proceso, o la gestión de las aguas no contaminadas que pueden reutilizarse;
- la generación de residuos sólidos, que en el caso de la producción de cal consisten en polvo, residuos según las impurezas contenidas en la roca calcárea y cal hidratada, que puede reciclarse o reutilizarse para determinados productos como la cal para construcción o para la estabilización de suelos;
- el ruido, relacionado con diversas fases de la producción de cal, desde la extracción de materias primas, cribado, almacenado, empaquetado, transporte y el generado por los ventiladores.
- la depredación del paisaje, en lo referente a las canteras.

Lo cierto es que, para poder cuantificar el impacto ambiental de la producción de cal sería necesario obtener los procesos utilizados por los distintos fabricantes y también los recursos que precisan y los residuos que generan por tonelada de producto empaquetado, por ejemplo. Y estos datos, a día de hoy, en España no son públicos.

Un argumento, a menudo citado, es la sostenibilidad de los procesos tradicionales de producción. Este argumento se basa en considerar: que los hornos tradicionales son de escasísimo impacto en su construcción; que el combustible a base de biomasa es renovable; y en considerar que están distribuidos por el territorio y por tanto reducen enormemente el impacto por transportes. Sin embargo los hornos tradicionales son enormemente ineficientes. Basta observar (Figura 16) el consumo de calorías por gramo de cal producido a mediados del s. XVIII, que representa la forma más tradicional de producción (4000 a 8000 kcal/kg), con el consumo necesario mediante los sistemas de tecnología industrial de finales del siglo XX (1500 kcal/kg) (36).

⁹ En las guías ambientales no es posible separar los datos de la cal del conjunto cemento+cal.

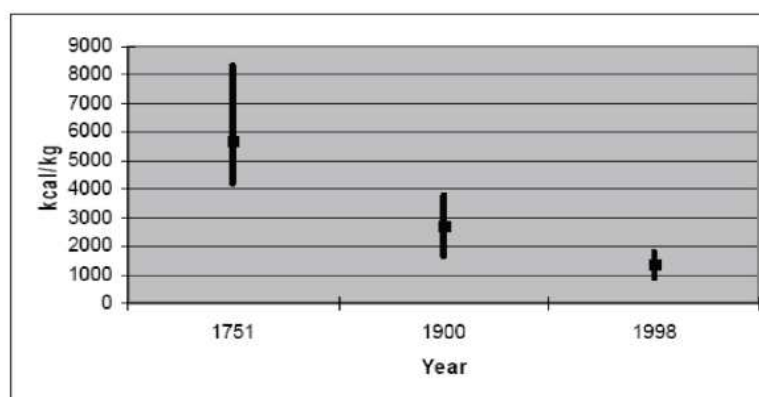


Figura 16 Figura presentada por A. Rattazzi en la que se relaciona la energía relativa aplicada para producir óxido de cal en función de la tecnología disponible (36).

Existe poca información referente a datos de CO₂ emitido en procesos de calcinación (tanto de cales como de cementos) así como de CO₂ reabsorbido en procesos de carbonatación. Sí existen estudios realizados por agencias medioambientales de los Estados Unidos y de Canadá, a partir de la información proporcionada por las asociaciones de productores de cal de estos países, pero que son difícilmente equiparables con el modelo productivo español y, sobre todo si queremos compararlos con las producciones tradicionales de la cal en hornos de pequeñas dimensiones y que usan como combustible productos de rechazo o biomasa de proximidad.

En nuestro entorno a menudo se parte de la información facilitada por la empresa CESA (Chaux et Enduits de Saint-Astier) (

Tabla 1) que comercializa alguno de sus productos en España bajo el nombre comercial de “Naturcal” (36) (37).

		kg CO ₂ / T conglomerante		
Material	Designación	Producción (combustión + descarbonatación)	CO ₂ reabsorbido	Balance
Cemento Portland	CEM- I	819	0	819
Cal Aérea	CL	872	535	337
Cal Hidráulica 3,5	NHL 3,5	606	270	336
Cal Hidráulica 5	NHL 5	635	220	415

Tabla 1 Balance del CO₂ generado-recuperado en distintos conglomerantes. Fuente (36).

No parecen muy ajustados los datos del impacto por producción, dado que las temperaturas y tecnologías de producción de las cales aéreas y hidráulicas en hornos verticales son muy similares. Sí podemos calcular el CO₂ reabsorbido, a partir de las composiciones químicas de los diferentes conglomerantes y de la estequiometría de las reacciones. Este cálculo tiene interés pues generalmente no se considera la capacidad de carbonatación que presentan los cementos, dado que en un elemento de gran compacidad y mucho espesor (como suele ser el hormigón armado) este fenómeno es sólo muy superficial. En el caso de elementos como los morteros

Así se ha calculado el CO₂ reabsorbido para una cal aérea, dos cales hidráulicas y un cemento, todos ellos a partir de los datos composicionales que facilitan los fabricantes correspondientes¹⁰, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Cálculo del CO₂ reabsorbido en procesos de carbonatación total de los conglomerantes utilizados¹¹.

Como puede constatare los cálculos muestran resultados muy parecidos para la cal aérea y la cal hidráulica de CESA a los facilitados en la Tabla 1, pero significativamente diferente para la cal hidráulica de Lafarge. También es claramente diferente el hecho de considerar el CO₂ reabsorbido en el caso del cemento. Podríamos reconsiderar la Tabla 1 de la manera siguiente:

Alita: $6(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 31 \text{H}_2\text{O} \text{ ----> } 5.\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O} + 13 \text{Ca(OH)}_2$
 Belita: $6(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 12 \text{H}_2\text{O} \text{ ----> } 5.\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O} + 7 \text{Ca(OH)}_2$

45

		kg CO ₂ / T conglomerante		
Material	Designación	Producción (combustión + descarbonatación)	CO ₂ reabsorbido	Balance
Cemento Portland	CEM- I	819	307	512
Cal Aérea	CL	800 ¹²	535	265
Cal Hidráulica 3,5 CESA	NHL 3,5	606 ¹³	270	336
Cal Hidráulica 3,5 Lafarge	NHL 3,5	800 ⁶	456	344

Tabla 3 Cálculo del balance de CO₂ para 4 conglomerantes industriales.

Para intentar completar una cierta comparativa en impacto ambiental entre conglomerantes es preciso considerar sus prestaciones. En un reciente trabajo (2) se estudian cuan parecidos pueden llegar a ser un mortero de cal hidráulica y un determinado mortero mixto de cal y cemento, confeccionados con los productos de la

Tabla 3. Se concluye que las siguientes dosificaciones las podemos considerar equivalentes en prestaciones (Resistencia a flexión, a compresión, módulos de Young, porosidades y comportamiento hídrico, etc.) son las expresadas en la Tabla 4:

Relaciones en peso de componentes		
Tipo cal hidráulica	NHL : Árido	CEM : CL : Árido
Cal Hidráulica 3,5 CESA	1 : 8,7	1 : 1 : 27
Cal Hidráulica 3,5 Lafarge	1 : 8,7	1 : 2,3 : 28

Tabla 4 Dosificaciones de morteros mixtos equivalentes a morteros de dos NHL comerciales.

Si aplicamos los valores de balance de CO₂ emitido final de la Tabla 3 a las dosificaciones equivalentes (Tabla 4), obtendremos unas emisiones de CO₂ atribuibles únicamente a la fabricación y carbonatación de los conglomerantes como los que muestra la Tabla 5. Se puede observar cómo en un caso es claramente mejor el mortero mixto cemento: cal aérea, mientras en el otro son equivalentes, algo mejor la cal hidráulica.

Balance Kg CO ₂ / T mortero		
Tipo de mortero equivalente	NHL : Árido	CEM : CL : Árido
1 : 8,7 (Cal Hidráulica 3,5 CESA)	54,6	26,8
1 : 8,7 (Cal Hidráulica 3,5 Lafarge)	35,5	38,7

Tabla 5 Balance kg CO₂ / T mortero.

Finalmente ubicando estos morteros en Barcelona, los saldos se decantarán claramente en favor de los morteros mixtos dado que tanto la cal aérea como el cemento considerados son de producción relativamente cercana, mientras las dos cales hidráulicas consideradas son de fabricación francesa, pero se comercializan en Barcelona.

¹² Dato supuesto, a partir de tecnologías de producción similares y a temperaturas también similares entre si y inferiores a las del cemento.

¹³ Parece una cifra algo reducida de forma comparativa con las demás cales, máxime conociendo la fábrica.

Lógicamente aquí se han tratado unos casos particulares (productos, dosificaciones, etc.) que muestran sus resultados. Otros materiales, dosificaciones, etc., generaran resultados distintos. Pero el caso tratado no es en absoluto un caso extremo y permite ilustrar que no puede afirmarse genéricamente que un mortero de cal sea mejor o peor a efectos medioambientales, que un mortero mixto de cemento y cal.

En cualquier caso parece claro que el camino correcto es la generalización de sistemas muy industrializados de cocción con capacidad de decenas de toneladas/día, en producción ininterrumpida frente a los hornos tradicionales. Esta evolución conlleva mejoras claras de eficiencia energética (36), de control del CO₂ emitido, de homogeneidad del producto, de garantía de calidad, etc. Pero no hay que olvidar el hecho de que escoger materiales de proximidad es una medida drástica de reducción de los impactos ambientales asociados al sector de la construcción (38). Y en este sentido, en algunos casos la producción tradicional se podría considerar más sostenible si se trata de producciones para el consumo local.

Al mismo tiempo la producción industrializada a gran escala comporta poca flexibilidad de producción para generar productos ligeramente distintos que quizás pudieran ser más interesantes en determinados aspectos para el sector de la construcción. Esta diferenciación puede conseguirse, por lo menos parcialmente, a partir de procesos de apagado más tradicionales.

2.6 Uso actual de la cal en la arquitectura y la construcción. Cal vs cemento.

Actualmente el uso de la cal, en general, como conglomerante ha desaparecido prácticamente de nuestras obras comunes, excepto como componente de morteros predosificados. De hecho, resulta cada vez más frecuente utilizar los morteros predosificados, indiferentemente de qué tipo de conglomerante utilicen. Esta práctica, similar en otras industrias como la farmacéutica o la alimentación, conlleva la utilización de productos más constantes y más robustos, dotados de documentos de calidad, de recomendaciones de uso, de soporte técnico por parte de las empresas, etc. y permiten a los prescriptores referirse a las prestaciones y no a las características composicionales, que, por otra parte, desconocen absolutamente en muchos casos.

Una notable excepción son las obras de intervención en edificaciones patrimoniales donde por diversas razones se siguen utilizando las cales.

En la declaración de la Carta de Venecia (Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y de Conjuntos Histórico-Artísticos, 1964) (39) se describe la doctrina básica de lo que es ahora aceptado como un enfoque adecuado a la filosofía de la conservación y restauración de edificios históricos. Esto fue en parte consecuencia de la constatación de que el uso inapropiado de la reparación y sustitución de morteros a principios de siglo fue la causa de importantes daños a las estructuras históricas. El concepto de compatibilidad de los materiales de reparación nuevos con los históricos se desarrolló a partir de la Carta de Venecia. Aunque la compatibilidad fue aceptada en principio, los criterios técnicos no se establecieron en ese momento. Como la actividad de conservación y restauración se hizo más frecuente en toda Europa, se hizo evidente que había una brecha importante en el

conocimiento y la comprensión de materiales compatibles entre los profesionales. En 1980, la investigación en esta área se había extendido y cada vez más ha ido produciendo más conocimiento.

La búsqueda de materiales compatibles ha adoptado dos enfoques opuestos: el “tradicional” y el “moderno”. El primero es un intento de encontrar soluciones a partir de materiales tradicionales para cumplir posteriormente los requisitos de compatibilidad, y la segunda parte de los requerimientos de materiales compatibles para desarrollar una formulación de un mortero de reemplazo que podría utilizar materiales modernos.

En obras de restauración, la **cal en pasta**, o pasta añeja de cal apagada, o simplemente cal añeja, se prescribe a menudo con preferencia respecto a otras formas de cal, y en particular respecto a la **pasta de cal** (pasta generada a partir de la cal apagada en polvo), disponiendo de escasa información técnica precisa en relación a las diferencias de las propiedades de servicio esperadas de ambos materiales, el comportamiento reológico, las diferencias en el curado y las propiedades físicas de los morteros elaborados a partir de dichas pastas, una vez carbonatados.

Hay dos razones principales que explican la falta de conocimiento científico moderno en la evaluación y en el uso de morteros a base de cal rica en calcio.

La primera es la confianza de algunos arquitectos y conservadores arquitectónicos en observaciones empíricas, a menudo contradictorias, como fuente de información técnica, en contraposición a los estudios científicos sistemáticos. El conocimiento en relación a la cal, a menudo deriva principalmente de observaciones empíricas de artesanos expertos y de facultativos, de explicaciones históricas en la literatura o de observaciones de uso continuado en regiones relativamente aisladas en las que las prácticas tradicionales han perdurado (por ejemplo Norte de África, América Central). Aunque este tipo de conocimiento tiene su valor, sólo proporciona información parcial y podría no ser precisa, a veces perpetuando de esta manera hipótesis y prácticas erróneas.

La segunda razón para este relativamente reducido conocimiento en relación a la evaluación y el uso de morteros a base de cal, radica en el hecho de que, desde el siglo XIX, la práctica habitual en la edificación ha sido la de reducir espesores y tiempos de aplicación, tiempos de espera y la de usar ligantes más resistentes. El paradigma de la ciencia de la edificación moderna ha conducido a buscar morteros para hacer obras de fábrica de ladrillos que fueran más resistentes, más rígidos y de un fraguado más rápido. El fraguado y endurecimiento más rápido ha sido defendido porque permite reducir el plazo de construcción. Y por otro lado no podemos obviar el hecho de que los cementos Portland han posibilitado la aparición y el uso extenso del material por excelencia de la edificación y la obra civil: el hormigón.

Por todo ello, los estudios técnicos se han centrado principalmente en los conglomerantes hidráulicos. El conocimiento disponible en la literatura industrial y científica está notablemente descompensado a favor de los materiales hidráulicos de altas prestaciones, mientras que los estudios sobre la tecnología de la cal tradicional son, comparativamente, muy pocos. Por cada artículo científico que se publica en

torno a la cal y sus morteros en construcción, se publican decenas de artículos referidos a los cementos tipo Portland, sus morteros y hormigones.

Es cierto que la utilización de cementos presenta numerosas ventajas como: mayores resistencias mecánicas (compresión, tracción, dureza al impacto o rayado); mayores velocidades de fraguado y endurecimiento; menor demanda de agua para una consistencia determinada lo que se traduce en menores retracciones y menores permeabilidades; y dada la situación actual de producción y desarrollo, es más económico por unidad de peso, es mucho más económico por unidad de resistencia (lo que permite reducir el consumo) y existe un amplio mercado de materiales industriales complementarios como aditivos y adiciones.

Sin embargo, la utilización del cemento en la confección de morteros, pastas, grouts de inyección, hormigones, etc., para intervenciones en obras de restauración, donde había compuestos de cal, puede comportar diferentes problemas:

Un primer grupo son aquellos vinculados a la posible incompatibilidad con otros materiales presentes en la obra y que puede ser motivo de la formación de nuevos elementos nocivos, generalmente expansivos. Es el caso, por ejemplo, de la formación de ettringita secundaria como consecuencia de la aportación de sulfatos propios del ambiente, del terreno, etc., a algunos compuestos de aluminato cálcico hidratado presentes en un cemento portland endurecido o a determinadas puzolanas de carácter eminentemente aluminico (40) (41).

Análogamente, encontramos casos de formación de determinadas sales solubles que se desplazan disueltas por la red porosa hacia la superficie formando, por evaporación del agua del medio, eflorescencias o cripto-eflorescencias cercanas a la superficie, lo que comporta tanto manchas como erosión superficial del material. Este proceso patológico no es exclusivo del cemento Portland. Muchos otros materiales como determinados cementos naturales o incluso las arenas o aguas utilizadas en la intervención pueden ser las aportadoras de los iones solubles.



Figura 17 Efecto de la migración a la superficie de sales solubles en una intervención local en un muro con un mortero que contiene cemento portland. Monasterio de Sant Pere de Rodes, Girona.

Una segunda cuestión se centra en el diferente módulo de deformación del mortero de cemento portland respecto del mortero de cal (42). El mortero de cemento es más rígido que el de cal, lo que conlleva un cambio de rigidez de partes de un monumento y un comportamiento deformacional y tensional diferente.

La dilatación térmica (expansión-contracción) de casi todos los morteros es similar y depende básicamente de la naturaleza (tipo de grano y granulometría) del árido. La dilatación térmica de la piedra o los ladrillos es, habitualmente, más alta que la de la cal llegando a ser el doble. Una vez la expansión del mortero queda confinada entre los ladrillos o entre bloques de piedra, los morteros de cal y los morteros mixtos de cal-cemento limitan su dilatación térmica a la de los ladrillos. En cambio, los morteros de cemento portland sufren su propia dilatación térmica más alta y, en consecuencia, inducen en los ladrillos o en los bloques de piedra, esfuerzos cortantes/rasantes que a menudo originan daños.

También puede ser significativa la diferencia de permeabilidad al agua y al vapor de agua de los distintos morteros, como consecuencia de la formación de la red porosa y de la precipitación de la portlandita “secundaria” en la misma. Éste es un fenómeno en el que la forma de la red de poros tiene mucho que decir y, por tanto, también está vinculado a aquellas cuestiones que la generan (relación agua-cemento, granulometría, retracción, proceso de curado, etc.).

La baja porosidad de los morteros de cemento portland dificulta el movimiento del agua. Esto puede provocar una acumulación de humedad por detrás de éstos, generando daños de congelación y deposición de sales (algunas originadas por el

mismo cemento) en los ladrillos o piedras adyacentes, que pueden provocar exfoliaciones, lascas, hundimientos en las esquinas o los bordes y eflorescencias. En otros casos pueden provocar problemas por elevación de las cotas de evaporación de la humedad generada por capilaridad o condensaciones intersticiales por efecto de la baja permeabilidad al vapor u otros.

Lo cierto es que ya hace mucho tiempo, desde la mencionada Carta de Venecia (39), que se considera inapropiado el uso de cementos en obras arquitectónicas patrimoniales a partir del conocimiento de sus efectos y por su incompatibilidad con las técnicas y materiales existentes y así, en las distintas recomendaciones y documentos que elaboran la UNESCO y las distintas entidades colaboradoras como el Conseil International des Monuments et des Sites (ICOMOS) se prescribe lo siguiente (43):

2. Investigación y diagnóstico

.....

2.3 La práctica de la conservación requiere un conocimiento exhaustivo de las características de la estructura y los materiales. Es fundamental disponer de información sobre la estructura en su estado original y en sus primeras etapas, las técnicas que se emplearon en la construcción, las alteraciones sufridas y sus efectos, los fenómenos que se han producido y, por último, sobre su estado actual.

3. Medidas correctoras y de control

.....

3.7 La elección entre “técnicas tradicionales” e “innovadoras” debe sopesarse caso por caso, dando siempre preferencia a las que produzcan un efecto de invasión menor y resulten más compatibles con los valores del patrimonio cultural, sin olvidar nunca cumplir las exigencias impuestas por la seguridad y la perdurabilidad.

.....

3.10 Deben determinarse todas las características de los materiales (especialmente cuando son nuevos) que vayan a utilizarse en una obra de restauración, así como su compatibilidad con los existentes. En ese estudio deben incluirse los impactos a largo plazo, a fin de evitar efectos secundarios no deseables.

La realidad no es exactamente la misma. A menudo los operarios, que son quienes finalmente hacen el trabajo, no son capaces de emplear exclusivamente cal cálcica básicamente “porque no tira”. Detrás de esta tan extendida expresión hay una realidad incuestionable, el endurecimiento de la cal aérea es mucho más lento y pide unos ritmos de obra que no son los de hoy.

De nada sirve prescribir desde el proyecto y la dirección si no hay suficiente oficio y condiciones para desarrollarlo.

Igualmente la confusión en la terminología y la buscada similitud fonética de determinados morteros predosificados ha ayudado a crear más confusión y un cierto “aire misterioso”, que no tiene el cemento, que ya se sabe: ¡es cemento! Sin embargo hay multitud de cementos Portland distintos, más o menos adecuados para diferentes usos y ambientes.

De forma más exagerada aún se simplifica el mundo de las cales a “la cal”, como si ésta fuera única.

Pero lo cierto es que las reparaciones, las reposiciones, los enlucidos con morteros que contienen cemento portland, usados en obras de fábrica de ladrillos, son prácticas especialmente perjudiciales, pero que han sido utilizadas habitualmente a lo largo del siglo XX. Hay muchos ejemplos de reparaciones con cemento de antiguas obras de fábrica que demuestran que éste puede llegar a ser menos durable que los propios morteros originales y que, con el transcurso de pocos años, puede acabar causando lesiones en fábricas de ladrillos que han perdurado a lo largo de siglos.

Pero a menudo el auténtico enemigo ha sido el hormigón armado. Determinadas intervenciones que comportaron el uso del hormigón armado han evolucionado con las lesiones de corrosión por carbonatación propias de este material compuesto.

Por lo anteriormente expuesto, se puede entender que una de las preocupaciones importantes en las conservaciones arquitectónicas haya sido la necesidad de encontrar alternativas a los conglomerados en base a cemento portland para tratamientos correctores, así como la necesidad de identificar materiales más compatibles para estas intervenciones. El creciente interés por el uso en morteros y en revoques de cal, a menudo calificado como *renacimiento de la cal*, se debe básicamente al hecho de que se considera a priori que los modernos conglomerantes de cal son materiales compatibles para ser empleados en la conservación de morteros de cal y enlucidos históricos, en base a la práctica de intentar replicar, de la manera más fiel posible, la composición del mortero original.

Existen también multitud de ejemplos en los que se han aplicado materiales en base a cal (típicamente morteros de cal o morteros con cal), en los cuales se han producido diversas disfunciones imputables al material y, sobretudo, a la falta de oficio tradicional, perdido por años de “colonización” cultural del mundo del cemento portland (44).

2.7 La cal y el conocimiento popular y científico

Efectivamente, aún hoy, la cal es un material muy sujeto al oficio de su aplicación y a la valoración por parámetros más propios de tiempos pasados. Ideas como que la “buena cal” es la procedente de determinado fabricante, o “la mejor es” la de determinado artesano que se la prepara él mismo con una receta ancestral, o la que tiene como mínimo unos meses (o unos años) de envejecimiento es mejor que la recién apagada, o simplemente la cal en polvo no sirve, desde nuestro punto de vista (científico y tecnológico) no son suficientes.

En la presente investigación pretendemos confrontar algunas de estas afirmaciones “populares” con datos medidos de forma científica, que nos permitan confirmar o negar las ideas anteriormente dichas y, también, algunos planteamientos realizados desde el mundo científico.

Determinados parámetros de conocimiento y de control de calidad de las cales están suficientemente articulados con la normativa vigente, básicamente las *UNE-EN 459 Cales para la construcción* (45). Nos referimos a parámetros como los límites en las composiciones químicas, las resistencias mecánicas para las NHL y las HL, la estabilidad dimensional, la finura u otros. Sin embargo una de las características más

apreciadas por los artesanos aplicadores de pastas y morteros con cal no está en absoluto regulada a nivel europeo. Nos referimos a la trabajabilidad.

Como se verá más adelante, este concepto engloba diferentes apreciaciones que podemos medir de diferentes maneras. Una de las formas de determinar el comportamiento deformacional de este material en estado fresco es mediante la reología, o como sucede en nuestro caso, mediante la determinación de la viscosidad. Los resultados de la viscosidad de las pastas y morteros son consecuencia de multitud de factores entre los cuales destaca la distribución granulométrica de las partículas, la forma de estas y como se ordenan en el fluido cuando este es movilizado por un esfuerzo.

Pues bien, el estudio que se desarrolla seguidamente se centra en estos parámetros para dar respuesta a cuestiones de tipo procedimental (cómo medir la distribución granulométrica, cómo caracterizar los diferentes cristales que forman la pasta y cómo medir la viscosidad) para, una vez estipulado el procedimiento, aplicarlo a un conjunto de cales representativas de las que se encuentra en nuestro entorno y poder constatar con los resultados científicos algunas de las afirmaciones populares respecto del envejecimiento de las cales en pasta o de la validez de las cales en polvo.

3 Estado del arte

Existe una numerosa bibliografía referente al tema de las cales y los morteros con ellas realizados. La más importante recopilación del estado del arte se debe al proyecto “Lime Mortars & Plasters” del *The Getty Conservation Institute*, finalizado en 2003 (17). En este trabajo se clasifican las referencias bibliográficas en los diferentes apartados de la Tabla 6:

		Referencias
Conservación	Diagnos	30
	Documentación y monitorización	48
	Conservación y tratamiento	251
Historia	Contexto histórico	153
	Técnicas tradicionales artesanía	135
Caracterización y análisis	Aditivos	121
	Técnicas analíticas	205
	Composición	308
	Modelización	87
	Materiales puros	137
	Preparación de muestras	37
	Textura	127
Propiedades	Ensayos de desgaste artificial	35
	Patrones de deterioro y desgaste	90
	Durabilidad	86
	Exposición	18
	Propiedades mecánicas	249
	Normativa	147
Tecnología	Calcinación	64
	Carbonatación – curado	155
	Componentes hidráulicos	237
	Selección del material	46
	Aplicación del mortero	41
	Preparación del mortero	33
	Recetas y formulaciones	62
	Apagado – hidratación - envejecimiento	131

Tabla 6 Cuantificación agrupada por apartados de referencias que forman la bibliografía recogida en el proyecto “Lime Mortars & Plasters” del *The Getty Conservation Institute*.

Se trata de un trabajo de selección del conocimiento más relevante hasta la fecha, realizado por un grupo internacional de expertos (17).

3.1 Del ciclo de la cal

En los últimos 15 años se han dado avances en el conocimiento de las cales y sus morteros que nos permiten una mayor comprensión de las características de los materiales y los procesos de cambio que sufren en las distintas etapas del “ciclo de la cal” (Figura 6). Seguidamente se destacan algunos de estos aspectos desde un punto de vista actual y no siguiendo necesariamente la cronología de su generación.

3.1.1 De la cocción y del apagado

La calidad de la cal se ha relacionado tradicionalmente con factores como la roca madre, el sistema de calcinación, el método de apagado o el tiempo de envejecimiento de las pastas de cal (46) (21).

La reactividad es la capacidad de la cal viva de responder con un cambio químico al mezclarse con el agua. Esta reactividad está afectada por la pureza, la homogeneidad y la cristalinidad de la materia prima, la compacidad de la carga del horno y el tamaño de las partículas en la cocción, la temperatura máxima alcanzada en el horno y el tiempo de permanencia (46) (21) (47) y otros factores como la porosidad de la partícula calcinada, su superficie específica o el propio hecho de tratarse de partículas provenientes de un proceso de trituración de la cal viva.

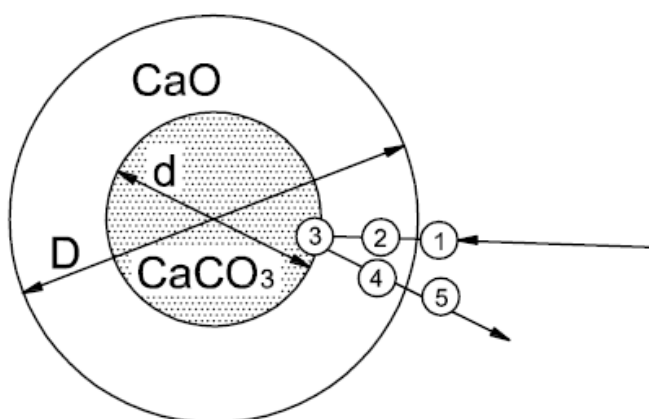


Figura 18 Figura extraída de (46) en la que se ilustran las 5 etapas del proceso de cocción del carbonato cálcico.

La cinética de la cocción se puede esquematizar como muestra la Figura 18, que describe como va avanzando el frente de descarbonatación desde la superficie de la partícula hacia el interior.

1. Primeramente la energía calorífica, el calor del ambiente del horno, se transmite por convección a la superficie del árido.
2. Transmisión del calor a lo largo del estrato descarbonatado (poroso).
3. Zona de reacción química de descarbonatación.
4. Difusión del CO_2 a través de la red porosa del estrato descarbonatado.
5. Incorporación al ambiente del horno del CO_2 generado, en función de la presión parcial de CO_2 en la atmósfera del horno.

Las variables *temperatura de la zona del horno – tamaño de partícula a calcinar – tiempo de permanencia en el horno* tienen mucha influencia en las características de los terrones de cal viva. Si idealizamos nuevamente las piedras a calcinar como esferas y las consideramos de diferentes tamaños (Figura 19), vemos que se pueden presentar situaciones para las de mayor tamaño en las que quede un núcleo del mineral todavía crudo o una correcta cocción para las de tamaño intermedio, sin restos de material crudo (soft-burned), mientras que para los tamaños menores se pueden dar situaciones de sobrecoCCIÓN por exceso de temperatura en las zonas superficiales (hard-burned).

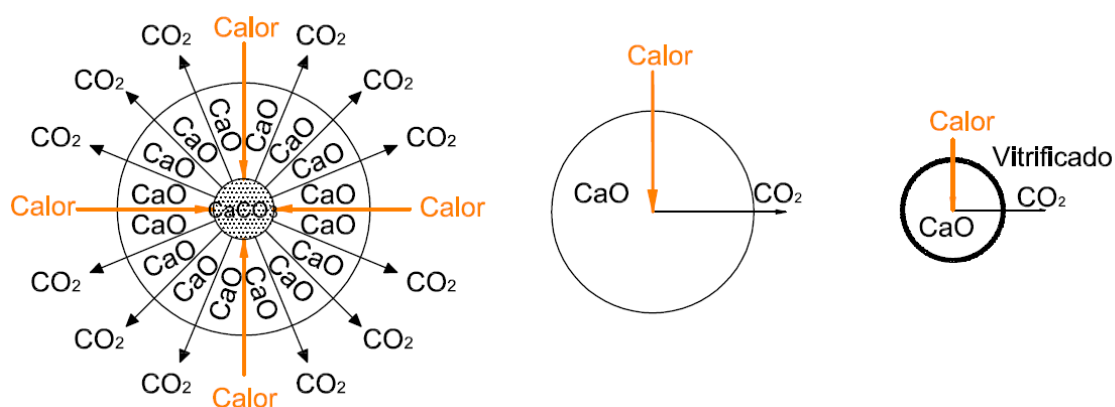


Figura 19 Figura extraída de (47), en la que se ilustra el efecto del tamaño de partícula del mineral respecto de la deshomogeneidad del producto calcinado.

La situación comúnmente buscada es conseguir partículas soft-burned sin núcleo central crudo. Para obtener mayores superficies específicas de los terrones de cal viva es preferible trabajar a menores temperaturas pero alargando el tiempo de permanencia en el horno, con tamaños intermedios y facilitando la eliminación del CO_2 del ambiente del horno para dificultar la recarbonatación a altas temperaturas.

La velocidad de apagado es una medida del tiempo que tarda en completarse el proceso de apagado. La reacción se considera completa cuando la temperatura de una muestra dada alcanza un máximo. Si la reactividad aumenta, la velocidad de apagado aumenta, el pico exotérmico también es superior y parece que la superficie específica de la cal hidratada también aumenta (48) (49) (50).

Hay normas que tipifican las condiciones para medir la reactividad de la cal viva (51), que básicamente definen condiciones adiabáticas, proporción cal viva vs agua y procedimiento de agitación, y que proporcionan como resultados un gráfico temperatura - tiempo.

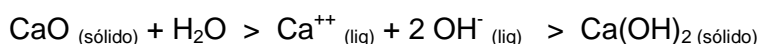
Al mezclar la cal viva con el agua para proceder a su apagado, se producen reacciones químicas y físicas que afectan al resultado del producto obtenido, en particular, al tamaño de las partículas generadas. Esta relación entre el proceso seguido y las proporciones de los componentes en el apagado en relación a los tamaños de partículas obtenidos se empezó a estudiar en 1960 (52).

Existen diferentes maneras de agregar el agua a la cal, o viceversa, que condicionan la proporción agua/cal, las temperaturas generadas, las velocidades de enfriamiento, la clasificación de las partículas por mecanismos físicos de decantación, etc.

Para comprender los procesos es preciso distinguir previamente entre el apagado en fase vapor y el apagado en fase líquida.

En el caso de apagado en autoclave se produce la hidratación a partir del vapor de agua. En este caso, el volumen de los poros de la cal viva de calcinación dulce, de mayor reactividad, es tan grande que la nueva fase formada en el apagado encuentra espacio suficiente sin pulverizar los terrones. Un terrón de calcinación dulce, apagado en autoclave con vapor de agua, prácticamente mantiene la forma externa dándose la conversión completa a cal apagada.

Sin embargo la forma más genuinamente tradicional de apagar la cal es en fase líquida. En la reacción de óxido a hidróxido en fase líquida se forman inicialmente iones Ca^{++} y OH^- que dan lugar a una solución más o menos saturada de la cual cristaliza el hidróxido de calcio.



En una cocción dulce (soft-burned), a causa de la elevada superficie específica y de la porosidad de la cal viva obtenida, el sucesivo tratamiento con exceso de agua en el apagado conduce a que la concentración de los iones en la solución aumente muy rápidamente y la sobresaturación consecuente sea muy elevada. En este caso, la cristalización se cumple con una elevada velocidad de germinación y una baja velocidad de crecimiento del volumen de cada cristal, y por tanto se forma un gran número de cristales pequeños.

En el caso de un apagado procedente de una cocción fuerte, se produce un moderado aumento de la concentración iónica y, consecuentemente, una pequeña sobresaturación que conlleva una reducida velocidad de germinación y una importante velocidad de crecimiento de los cristales que conduce a una distribución más amplia de tamaños de partículas con presencia de grandes cristales.

La velocidad de hidratación de la cal viva a cal hidratada mediante fase líquida responde a la expresión:

$$V = K \cdot [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{OH}^-]$$

Donde:

$[\text{Ca}^{++}]$ y $[\text{OH}^-]$ son las concentraciones de mol/l de cada especie iónica.

$K = A \cdot e^{-E_{\text{act}}/RT}$ ecuación de Arrhenius.

K: constante cinética (función de la temperatura).

A: factor pre-exponencial.

E_{act} : energía de activación.

R: Constante universal de los gases.

T: Temperatura absoluta.

Por tanto la velocidad aumenta al aumentar la concentración y es máxima en presencia de una fase líquida saturada de cal apagada. Por otro lado, el valor de K

también aumenta con el aumento de la temperatura mientras que este mismo aumento de temperatura disminuye la solubilidad de la cal apagada (Figura 20) y por tanto la concentración de iones en medio líquido.

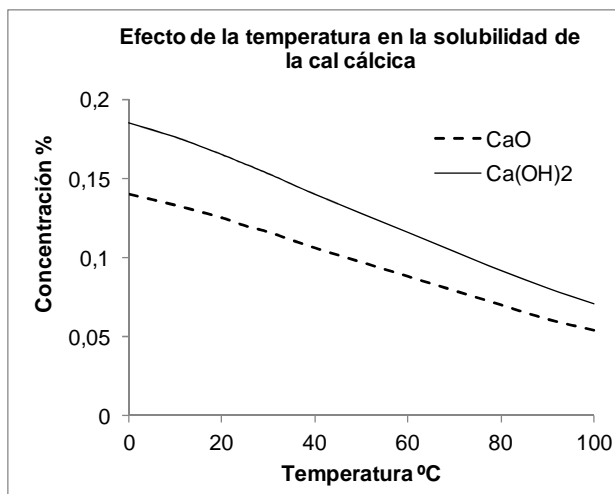


Figura 20 Efecto de la temperatura de la disolución en la solubilidad de la cal. Gráfico generado a partir de los datos de National Lime Association (53).

En definitiva, la velocidad de hidratación es máxima a la máxima temperatura a la que todavía es suficientemente elevado el grado de sobresaturación en Ca(OH)_2 de la fase acuosa. Este máximo se considera entre 80 y 95 °C, aunque realmente puede variar considerablemente en función del tipo de cal viva.

Pero la temperatura a lo largo del proceso de apagado no solamente afecta la velocidad de hidratación, si no que también condiciona el tamaño de las partículas generadas. Se considera (21) que a mayores temperaturas (cercas a los 100 °C) se consiguen menores tamaños de partículas, pero al trabajar a tan altas temperaturas se incrementa la probabilidad de generar *puntos calientes* en el interior de la masa, lo que puede producir partículas compactas y de mayor tamaño, generadas por aglomeración de cristales pequeños, mostrando así menores superficies específicas.

Llegados a este punto, aparece un segundo factor regulador de la velocidad de hidratación. Se trata del propio mecanismo de difusión de los iones disueltos en la superficie de reacción al medio general, el cual limita la formación de nuevos iones en la superficie del Ca(OH)_2 generado en la reacción. Desde un punto de vista práctico esta difusión se ve muy mejorada por un simple mecanismo de agitación, que no es necesario que sea muy enérgico dado que su efecto positivo llega a saturarse (50). El mismo proceso de agitación forzada dificulta la generación de puntos calientes y dificulta la agregación de pequeños cristales para formar grandes partículas.

Asimismo también es conocida la influencia de diferentes iones disueltos en el agua y el apagado de la cal, en particular los iones de Cl y Mg incrementan la velocidad de hidratación, mientras que los carbonatos y los sulfatos la ralentizan (54).

3.1.2 Sobre la cristalización de la portlandita y el proceso de agregación

Entender los procesos de cristalización y de formación de partículas en las pastas de cal proporciona una base científica para entender procesos posteriores.

Todas las pastas de cal rica en calcio son químicamente similares (la portlandita es la forma mineral del hidróxido cálcico). Estas pastas son básicamente dispersiones de cristales de portlandita en un medio dispersante compuesto por agua saturada de iones calcio. La solubilidad de la portlandita en agua destilada a 20 °C es de 1,65 g/l (1650 ppm) pero la solubilidad de las cales comerciales en agua suele ser mucho menor debido a la presencia común de trazas de sodio e hidróxido de potasio en las propias cales. La presencia de magnesia, sílice y carbonato no tienen ningún efecto sobre la solubilidad de la cal ordinaria, pero puede tener un marcado efecto en su velocidad de disolución. El tamaño de partícula también puede influir en la solubilidad (53).

Las diferencias en el comportamiento de las dispersiones de cal, tales como la trabajabilidad, tienen que ver con la textura o microestructura (o más precisamente, con la nanoestructura) de los cristales de portlandita presentes en dichas dispersiones.

Es bien conocido que se forman los cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante el proceso de apagado, esto es, cuando la cal viva (CaO) entra en contacto con el agua tal como describe la expresión [2].

La estructura cristalina del hidróxido cálcico está constituida por capas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que presentan una simetría hexagonal. Los átomos de hidrógeno están direccionados alternativamente en sentidos opuestos respecto del plano de la capa (Figura 21). Las capas están ligadas entre sí a través de fuerzas débiles del tipo Van der Waals, con el resultado de que los cristales hexagonales tienen una división basal perfecta. No se forman enlaces de hidrógeno entre las capas (la distancia inter-capa O-H = 3502 Å). Así pues, el enlace inter-capas es mucho más débil que el enlace intra-capa, de modo que las capas pueden ser separadas entre sí con una cierta facilidad. El resultado es que a partir de los prismas hexagonales pueden originarse plaquetas hexagonales, lo que, según algunos autores sucede durante el envejecimiento, pero también parece que estas plaquetas se forman inicialmente en determinadas condiciones de apagado (55) (56) (57).

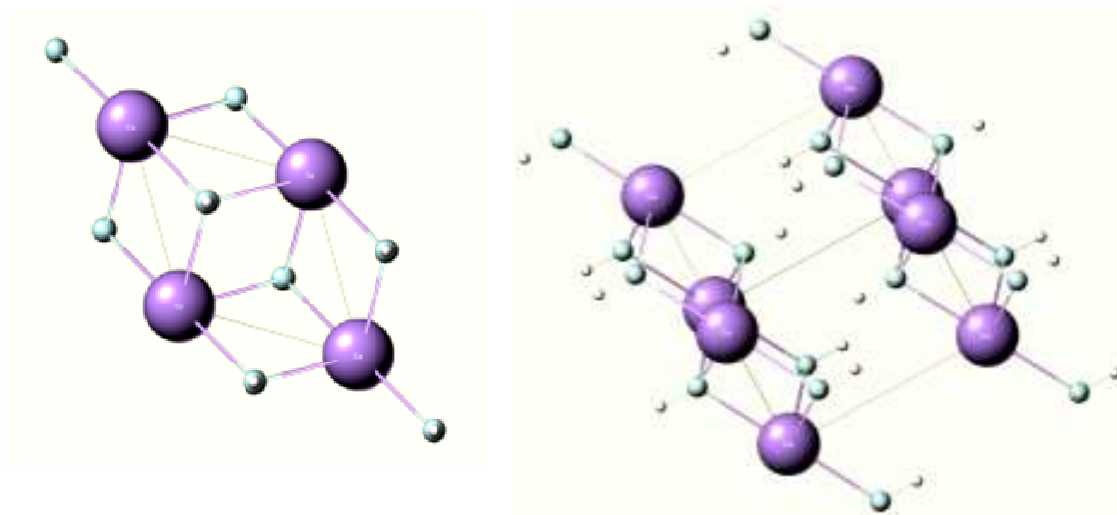


Figura 21 La estructura del cristal de hidróxido cálcico está constituida por capas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que tienen simetría hexagonal. Los átomos de hidrógeno (H) se encuentran enlazados alternativamente en sentidos opuestos en las direcciones normales al plano de la capa (Ca = violeta, O = azul celeste, H = blanco). Las capas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ están ligadas molecularmente mediante fuerzas de Van der Waals, con el resultado de que los cristales hexagonales tienen una división basal perfecta. Imagen procedente de (58).

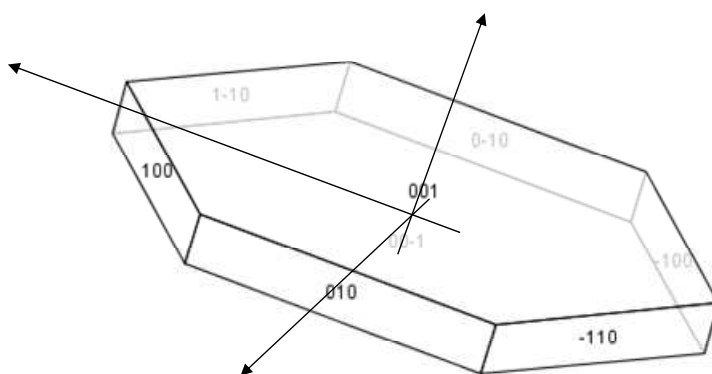


Figura 22 Representación de un cristal laminar de portlandita con las direcciones principales.

A lo largo del proceso de apagado, y dependiendo de diversos factores como son la temperatura del agua, la presión ambiente y la relación de óxido de cal vs agua, pueden predominar dos tipos de formas de cristales (ya sean plaquetas hexagonales o prismas hexagonales) (59), y se forman numerosos cristales de tamaño inferior a 1 micra (en el rango comprendido entre 20 y 400 nm) (60) (21).

Parece claro que un mayor número de plaquetas hexagonales y de cristales de nano-escala confieren a las dispersiones de cal en agua una naturaleza coloidal, proporcionando al mismo tiempo plasticidad, retención de agua y en definitiva, un incremento de la viscosidad.

Sin embargo, la cal hidratada en polvo se diferencia respecto de la cal en pasta, en que está sometida a un proceso de secado inmediatamente después de ser apagada. El propio proceso de apagado con una menor cantidad de agua, generalmente del orden de 0,5 a 0,75 del peso de la cal viva, más cercana a la estequiométrica (0,245

del peso del CaO), y la evaporación del exceso de agua, generada por la propia exotermia de la reacción de hidratación, proporciona el resultado en forma de polvo seco (61). Con este polvo se puede confeccionar una pasta mezclando en la obra cal hidratada en polvo con agua, que es lo que llamamos pasta de cal.

El secado de la portlandita, antes de la mezcla con agua, implica un cambio microestructural importante debido a la posible agregación de cristales. La pasta de cal así preparada presenta unas propiedades de trabajo organolépticamente distintas y cambia la manera en que los cristales interactúan con el agua, ya que el secado ha originado la floculación de los cristales o una agregación de difícil reversibilidad.

En un principio parece que el crecimiento orientado de los cristales es irreversible (ya que estos cristales no vuelven a convertirse en cristales más pequeños cuando son reintroducidos en agua) pero durante este proceso de secado también se dan, en menor número, agregaciones no orientadas, que sí son reversibles, ya que las agregaciones de cristales formadas sí se redispersan en el agua.

El proceso de floculación de cristales ha sido demostrado mediante técnicas como el microscopio electrónico de barrido (SEM), la difracción de los rayos X (DRX), las mediciones de la superficie específica por adsorción de nitrógeno con el método BET, la difracción electrónica de área seleccionada (SAED) y el microscopio de transmisión electrónica (TEM) (60).

Este proceso de aglomeración de los cristales, originado por el secado, queda ilustrado en la (Figura 23) en la que se muestran: las distribuciones de tamaños de partículas (PSD) de una cal en pasta; de esta misma pasta una vez secada en estufa; y de una cal en polvo comercial. Como se puede observar, la cal en pasta secada en estufa en laboratorio presenta una aglomeración de los nanocristales de Ca(OH)_2 , (de 40 a 400 μm) respecto de la muestra sin secar.

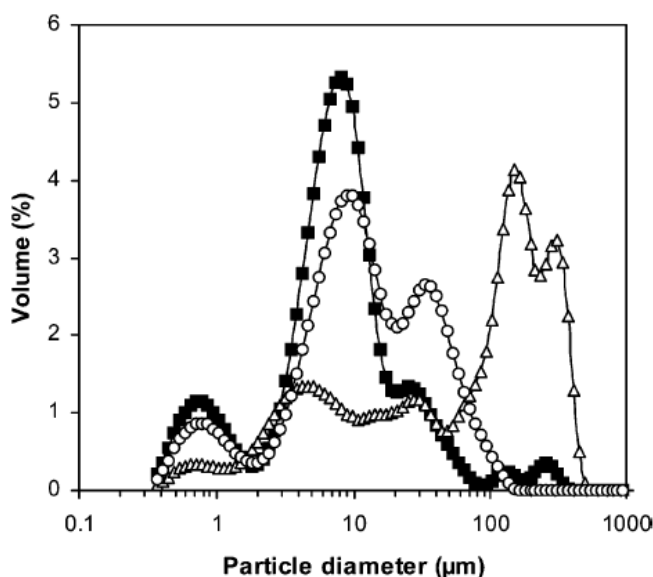


Figura 23 PSD procedente del trabajo publicado por Carlos Rodríguez-Navarro y otros (60) en el que se muestra el carácter polimodal de las distribuciones y el efecto de aglomeración de partículas como consecuencia del secado en estufa de una cal en pasta. Distribución de tamaños de partículas de (■) una cal en pasta, (○) cal apagada en polvo comercial, (Δ) cal en pasta desecada.

En el citado trabajo (60) se estudia la nanoestructura de muestras de cal en pasta secadas a partir de un proceso de liofilización (congelación y posterior sublimación). Este proceso no produce el efecto de aglomeración por secado y las partículas más pequeñas de la cal son evidentes, es decir, el secado por congelación y sublimación del agua (que inhibe la capacidad de los cristales de agregarse de una manera orientada) evita la floculación de enormes cristales que muestra la Figura 24. Por tanto, concluye el citado artículo, cuando el secado tiene que ver con el proceso de producción (como en el caso de la cal hidratada en polvo, convencional), se forman aglomerados más grandes, de porosidad variable. La cal en polvo industrial tendrá un comportamiento coloidal más pobre (viscosidad más baja), en comparación con las pastas de cal apagadas a partir de cal viva, compuestas de cristales mucho más pequeños con forma de placa.

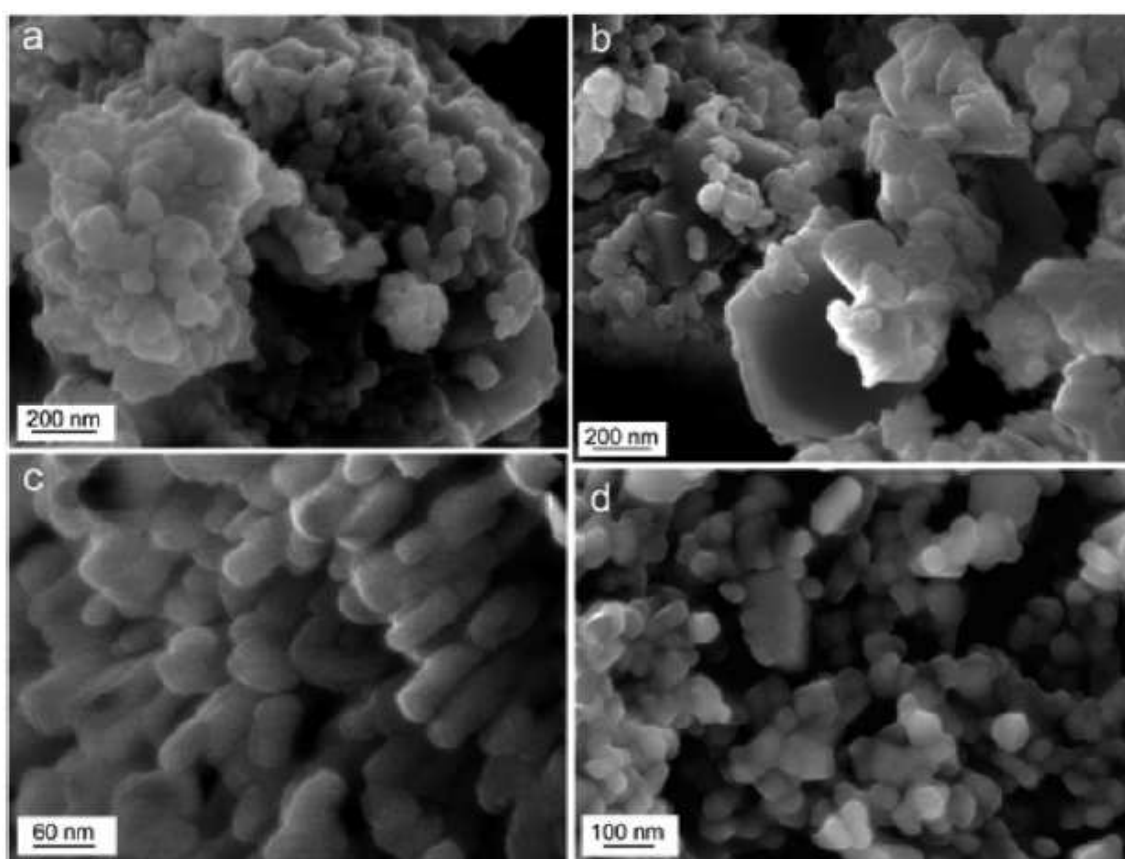


Figura 24 fotomicrografías FESEM de (a) cal en pasta desecada en estufa mostrando la aglomeración de nanocristales lameliformes de Ca(OH)_2 y (b) cal hidratada seca comercial, que muestran la aglomeración extensa. En las dos partes A y B, los agregados orientados al azar y orientados cristalográficamente están presentes. (C) Detalle de un agregado orientado representante de Ca(OH)_2 nanopartículas unidos por los planos (0001) y (d) los agregados orientados al azar en muestras de cal sublimadas apagada.

Para realizar ensayos SEM, TEM y BET con cales es necesario preparar de manera específica las muestras, ya que los resultados son sensibles al secado. Si el objetivo es la caracterización de la geometría y el tamaño de los cristales de hidróxido cálcico en las dispersiones de cal en agua, estos métodos requieren el secado por congelación, en oposición al secado en estufa o por aire, o como mínimo, una clara

especificación respecto del proceso de secado seguido. Por ejemplo, las mediciones de la superficie específica con el método BET y las fotomicrografías SEM obtenidas utilizando procedimientos normales de secado durante la preparación de la muestra, dificultan una representación precisa de la microestructura de los cristales de portlandita en la correspondiente pasta húmeda.

3.1.3 Discusión del envejecimiento de la cal en pasta

Está ampliamente reconocida la idea que es necesario dejar envejecer la cal en pasta un cierto tiempo antes de su uso, admitiendo que este envejecimiento mejora notablemente las prestaciones del material (trabajabilidad, retención de agua, resistencia a corto plazo). No está concretado cuanto debe ser este tiempo. Los autores clásicos como Plinio el viejo, Vitrubio, Alberti (62) (63) recomendaban tiempos muy prolongados y era norma admitida en el mundo clásico romano que la cal debía envejecer almacenada bajo agua un mínimo de tres años (46) (61). Autores más recientes (a partir de 1990) como **Ashurst** (64) fijan períodos mínimos de dos semanas pero con preferencia por los dos meses, mientras que **Carrington y Swallow** (65) ascienden el mínimo a tres meses. **Oriol García**, (ver 2.5.4), considera que cuanto más tiempo mejor.

A pesar de que la experiencia práctica había demostrado repetidamente que el envejecimiento tiene un efecto positivo sobre las propiedades de la dispersión de cal, poco se conocía sobre los mecanismos que conducen a las mejoras en la trabajabilidad, y la información disponible era un tanto contradictoria hasta la publicación de un artículo, fundamental en mi opinión, de **Rodríguez-Navarro, Hansen y Ginell** (66)

En este trabajo, publicado en 1998, a partir del estudio de dos cales apagadas procedentes de dos óxidos de orígenes distintos y comparando los resultados de los análisis mediante DRX, BET y SEM, realizados a dos edades (recientes y 14 meses), se concluye que efectivamente se observan cambios significativos en el tamaño y la morfología de los cristales de portlandita al envejecer bajo agua. Estos cambios muestran una reducción general de los tamaños de partículas, lo que comporta un incremento de la superficie específica. Se generan cristales laminares submicrométricos de portlandita a partir de cristales prismáticos grandes preexistentes debido a la disolución preferencial de algunas caras de los prismas, pero también se observan cristalizaciones secundarias heterogéneas en forma de cristales de portlandita laminares nanométricos sobre cristales preexistentes mayores (Figura 25), formando una estructura parecida a la “rosa del desierto”.

Además se sugiere un método para evaluar la evolución de la portlandita en el tiempo a partir de la DRX, un tema que retoma O. Cazalla en su tesis doctoral (2002) (67).

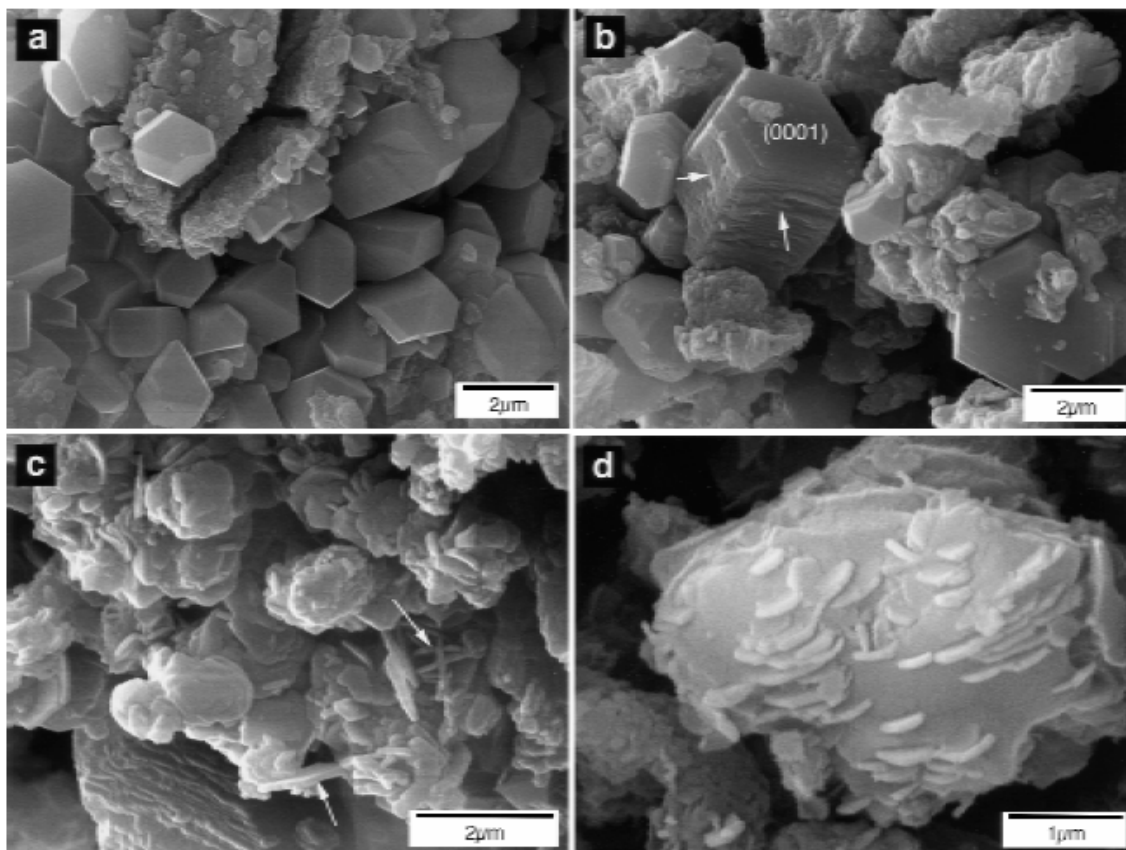


Figura 25 Microfotografías SEM: (a) Cristales de portlandita de una cal en pasta de reciente apagado; (b) evolución de los cristales de portlandita mostrando características de corrosión en una cal en pasta de dos meses; (c) pasta de un año que muestra cristales laminares submicrométricos de portlandita creciendo en cristales de portlandita preexistentes; (d) detalle pasta de un año ídem anterior (66).

En esencia, lo que ocurre es que una cal apagada fresca, formada básicamente por grandes cristales prismáticos, una vez envejecida durante dos meses se observa como estos cristales prismáticos grandes quedan grabados a lo largo de las caras de los prismas perpendiculares a los planos basales de la estructura del cristal de portlandita (Figura 25, b). Tras 14 meses de envejecimiento, había una disminución generalizada del tamaño de los prismas (de $> 2 \mu\text{m}$ hasta $< 1 \mu\text{m}$) y un aumento del número de placas hexagonales, a la vez que se observó un aumento global en la superficie específica de las partículas con el envejecimiento. Estos aspectos son coincidentes con el modelo (Figura 26) desarrollado por **Cazalla et al.** (68)

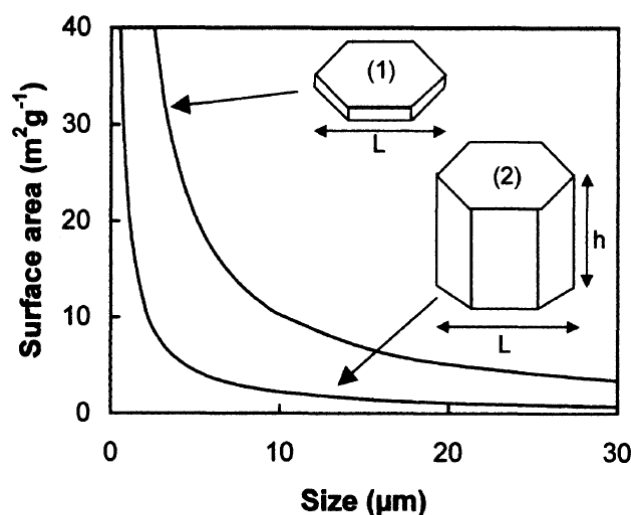


Figura 26 Relación entre la superficie específica de cristales de portlandita y el tamaño de las partículas. (1) cristales tabulares de esbeltez 1:10, (2) cristales prismáticos de esbeltez 1:1. Obtenido de (61).

Las implicaciones que se desprenden del estudio mencionado son que el envejecimiento de la pasta de cal apagada hace incrementar tanto el número de partículas planares hexagonales como la proporción de cristales más pequeños frente a los más grandes, lo que debería generar un incremento de la plasticidad, de la retención de agua y de la trabajabilidad de las pastas de cal añejas.

Hansen et al. (69) siguieron la investigación con el fin de comprobar si la morfología y el tamaño de cristal siempre evolucionan de la misma manera en el proceso de envejecimiento de las dispersiones de cal y cómo estos cambios influyen en la trabajabilidad, a partir del estudio con DRX, SEM, BET de cales en pasta de 0, 2 y 16 años.

La DRX reveló que las mediciones de la morfología de la cal en pasta de dos años de edad, fue muy similar a la de la cal en pasta recién cal apagada y el análisis SEM confirmó la existencia de grandes cristales prismáticos predominantemente de hidróxido de calcio. La superficie específica BET de la cal en pasta de dos años de edad fue muy baja, de 4 a 5 m^2/g .

La cal en pasta de 16 años de edad, mostró las características morfológicas similares a las pastas añejas del estudio anterior (66), pero con unas superficies significativamente más bajas.

Hansen et al. (69) utilizaron el ensayo normalizado con el plasticímetro Emley para intentar correlacionar los cambios morfológicos observados con la plasticidad de las cales en pasta. Esta correlación se consigue observándose la mala calidad de la cal en pasta de 2 años, en lo referente a la retención de agua y la plasticidad Emley, acorde con los resultados de las observaciones sobre el tamaño de las partículas y forma y superficie específica; mientras que para la otra cal en pasta añeja, la de 16 años, los resultados de retención de agua y plasticidad Emley fueron muy superiores y acordes con la morfología de los cristales de portlandita y la superficie específica.

Finalmente se llegó a la conclusión de que el envejecimiento no siempre mejora significativamente la calidad de la pasta de cal.

En 2009 se publicó un trabajo de **Ruiz-Agudo y Rodríguez-Navarro** (56) en el que se estudiaba el comportamiento reológico y la evolución microestructural de dos muestras de cal provenientes de una misma roca madre, pero procedentes de dos instalaciones de calcinación bien diferentes. Por un lado, la producción tradicional de Francisco Gordillo (FG) (citada anteriormente en *2.5 Fabricación e industria*) y por otro la producción industrial de Andaluza de Cales (AC), del grupo Calcinor. Además, ambas muestras se apagaban de igual manera en laboratorio.

Las diferencias se daban en el par tiempo-temperatura en el horno, así como en el tipo de horno, el tamaño del crudo y el combustible empleado. Como consecuencia de esta diferente calcinación, el óxido de FG (FGQ) era una cal calcinada prácticamente a muerte (hard-burned), mientras el de AC (ACQ) es una cal de calcinación suave o dulce (soft-burned). La Figura 27 muestra las diferencias de reactividad de ambas cales en un ensayo normalizado.

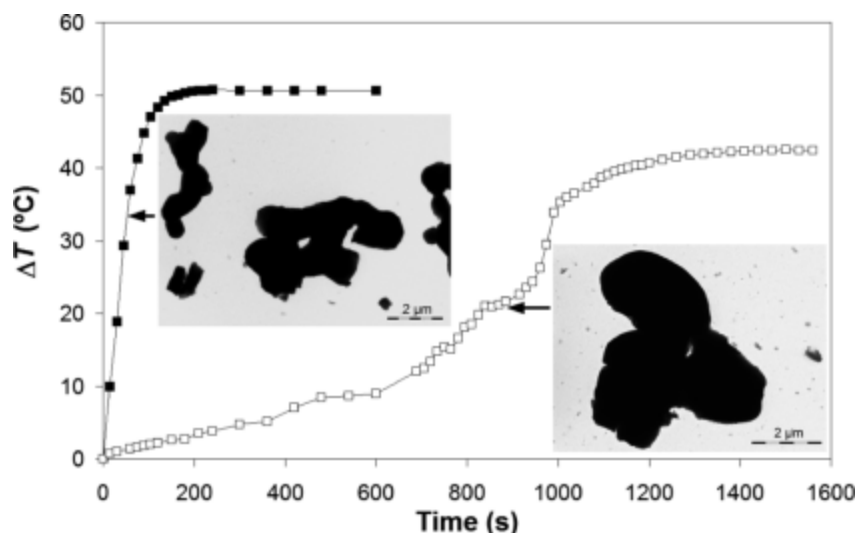


Figura 27 Ensayo de reactividad durante el apagado de las cales: la temperatura (T) versus tiempo para ACQ (■) y FGQ (□). Fotomicrografías representativas realizadas con TEM de los dos tipos de cal. Obtenido de (56).

Los resultados de la micro y la nanoestructura de la cal en pasta, proveniente de la cal calcinada a muerte (FGP), mostraron que a las 6 horas del apagado se observaron algunos prismas de portlandita de tamaño micrométrico (hasta 3 μm) y abundantes nanopartículas (de 20 a 200 nm) hexagonales planares de esbeltez media 7,5. También se observaron agregados de nanopartículas planares orientadas que tienden a transformarse en partículas secundarias de tamaños promedio entre 5 y 10 μm . La observación de la misma pasta al pasar tres años, muestra un cambio en la distribución granulométrica con la formación de grandes agregados (10 a 20 μm) y una drástica reducción de la cantidad de las partículas más pequeñas (Figura 28). De forma concordante, la superficie específica se redujo de 31,7 m^2/g para las 6 h. hasta 7,9 m^2/g para los 3 años.

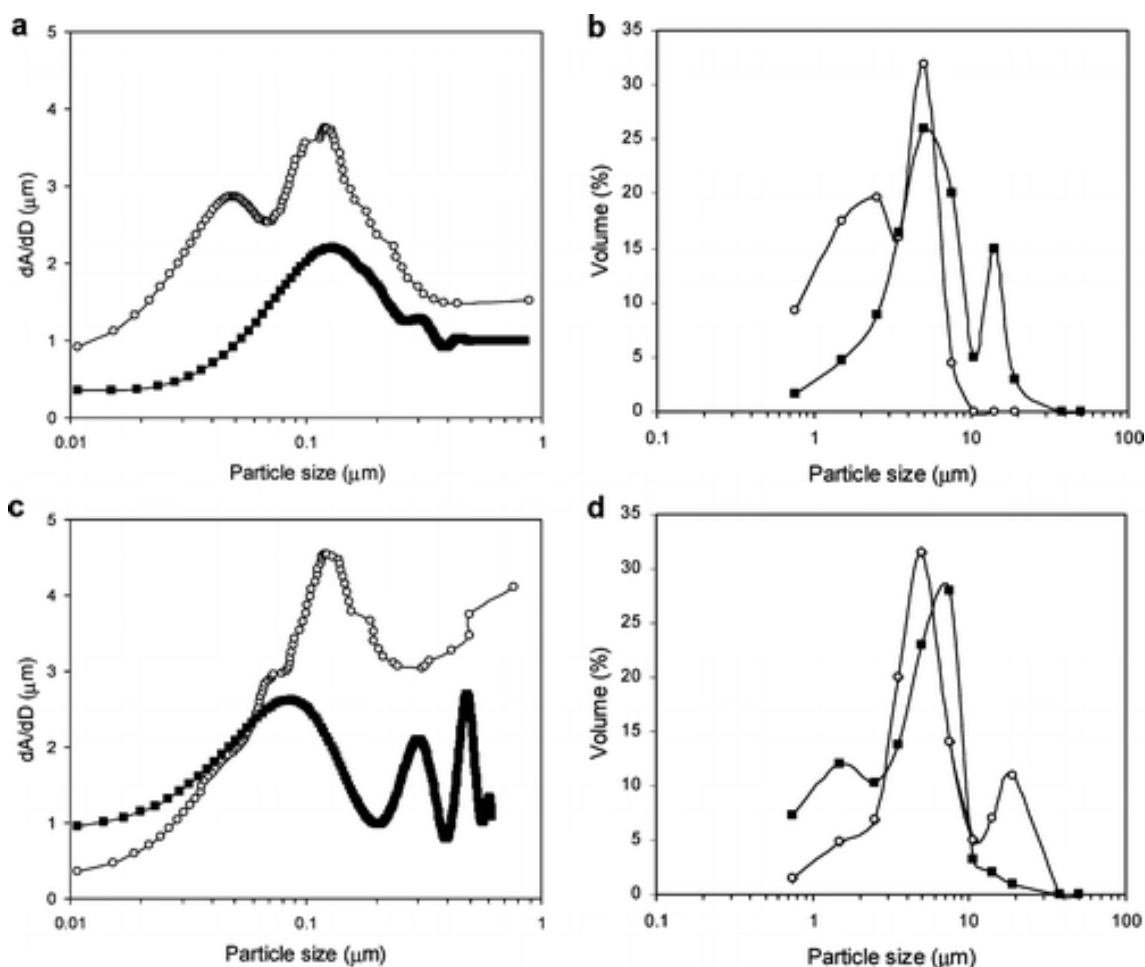


Figura 28 Distribución de tamaño de partícula de FGP (a, b) y ACP (c, d) obtenidos del análisis de imágenes digitales del TEM (A y C) y granulometría láser de dispersión (B y D). Leyenda: (○) pastas a las 6 h después de ser apagadas, (■) pastas 3 años de edad. Obtenido de (56).

En lo referente a la cal “de calcinación dulce” (ACP), su pasta a las 6 horas del apagado mostró mayor abundancia de cristales de tamaño micro y submicrométrico, menos nanocristales planares (entre 20 y 60 nm) de esbeltez promedio menor (5,9) y agregados de nanopartículas sin orientación preferencial. Las observaciones a los tres años también mostraron una variación en la distribución granulométrica con reducción de la cantidad de cristales más grandes y de los agregados, pero manteniendo casi constante la superficie específica de $19,0 \text{ m}^2/\text{g}$ para las 6 h. hasta $19,8 \text{ m}^2/\text{g}$ para los 3 años.

Ruiz-Agudo et al. (56) argumentan cómo las diferencias microestructurales de ambos óxidos (calcinación a muerte y dulce) afectan a la reactividad (Figura 27) y ésta, a su vez, genera procesos de hidratación distintos como consecuencia de las temperaturas locales generadas.

Asimismo argumentan que el tipo de cristales primarios y la formación de agregados durante y justo después del apagado de la cal determinan notablemente la evolución de la microestructura de la suspensión con el envejecimiento. Una vez que se produce la nucleación, la energía libre en exceso será compensada por el sistema, ya sea en el

crecimiento (reducción de la sobresaturación residual y la maduración de Ostwald¹⁴) o en la agregación (disminución de la energía de superficie) de los cristales recién formados. En el caso de la FGP, se prevé que la tendencia al crecimiento (maduración de Ostwald) y la agregación con el tiempo de envejecimiento sean mayores en comparación con ACP. Esto es debido al menor tamaño y mayor esbeltez (y, por tanto, a la energía de superficie) de los cristales primarios de FGP. Además, los agregados de plaquetas de portlandita que han crecido orientados cara a cara en la FGP parecen ser irreversibles, ya que la unión entre las partículas no se rompe fácilmente. Como consecuencia de ello, la superficie de la FGP se reduce drásticamente con el tiempo, a pesar de la reducción en la cantidad de cristales primarios prismáticos.

Para el caso de ACP, Ruiz-Agudo et al. (56), no esperan que se siga produciendo una agregación masiva a partir de los agregados iniciales inducidos por secado rápido, dado el mayor tamaño de las partículas coloidales, la superior polidispersidad, y la abundancia de cristales prismáticos (y por tanto menor energía superficial). Con el envejecimiento, los agregados desorientados formados durante el apagado del ACQ tienden a romperse. El envejecimiento de los cristales más grandes prismáticos tiende a formar plaquetas cristalinas de tamaño nanométrico. En general, la formación de las partículas más finas compensan el crecimiento de los cristales coloidales (es decir, maduración de Ostwald), manteniendo la superficie de la ACP casi constante en el tiempo.

En 2010, **Mascolo et al.** (57) estudian distintas calces en pasta provenientes de un mismo producto calcinado, apagado en balsa y envejecido por distintos tiempos (3, 12, 24, 36, 48 y 66 meses) mediante: las técnicas del “static laser scattering” (SLS), y “dynamic laser scattering” (DLS) aplicadas a dispersiones en alcohol etílico agitadas mediante ultra-sonidos; BET y SEM aplicadas a muestras liofilizadas; y porosimetría de mercurio aplicada a muestras desecadas.

Las principales conclusiones son:

La portlandita evoluciona con el tiempo transformando cristales prismáticos a formas laminares, pero no sólo a tamaños sub-micrométricos sino también a “grandes” cristales laminares de forma hexagonal.

La obtención de niveles más bajos de energía libre total de superficies es la fuerza motriz para la continua evolución de la microestructura de la portlandita en la cal en pasta, en lo referente a forma y dimensiones de los cristales.

Las diferencias de energía libre en las caras de los cristales y la propia anisotropía generan un sistema de solubilizaciones y recristalizaciones en las superficies de los cristales laminares que genera, a su vez, partículas submicrométricas, que con el tiempo tienden a la formación de hábitos cristalinos del tipo “rosa del desierto”.

Esta evolución comporta variaciones en la dimensión media de las partículas, que aumentan hasta un máximo en torno a los 24-36 meses de envejecimiento (en sus muestras), para disminuir después en almacenamientos mayores. De forma coherente

¹⁴ Maduración de Ostwald, crecimiento de partículas más grandes debido a la disolución de partículas más pequeñas y más solubles.

con esta evolución, varía el contenido de agua retenida en la pasta, aumentando a partir de períodos superiores a los 24-36 meses.

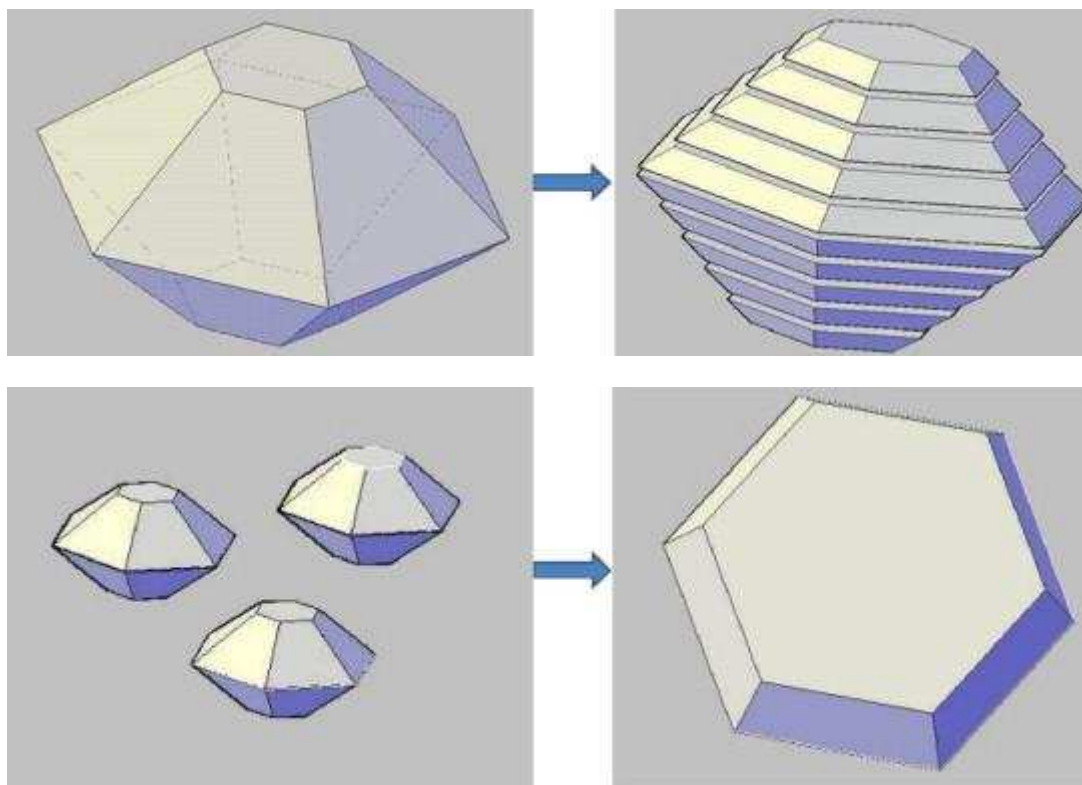


Figura 29 Esquema del mecanismo de formación de pequeños cristales laminares a partir de un cristal prismático (superior) y del mecanismo de formación de un único cristal laminar de gran dimensión a partir de pequeños cristales prismáticos de portlandita (inferior) Obtenido de (57).

En resumen, los resultados de Mascolo et al. (57) son básicamente coincidentes con los anteriores de Ruiz-Agudo y Rodríguez-Navarro (56), que a su vez refuerzan la idea resumen de Hansen et al. (69), en el sentido de que la evolución con el tiempo de la cal en pasta no siempre “mejora” (aumento de plasticidad y retención de agua) el producto o, como mínimo, no lo hace de igual manera.

3.1.4 La carbonatación de los morteros de cal

La carbonatación de la cal es debida a la reacción de ésta con el dióxido de carbono según la expresión [4]. Este aparente mecanismo simple responde a un proceso algo más complejo. De hecho se dan dos procesos de forma secuencial y también parcialmente simultánea.

El primer proceso conlleva la pérdida gradual de las propiedades reológicas de la pasta, es decir, disminuye la trabajabilidad, la plasticidad, confiriendo a la masa un grado de rigidez sin mostrar aún una verdadera resistencia mecánica. La cinética de este proceso se ve muy afectada por las condiciones geométricas (superficie específica del elemento constructivo), climáticas (humedad, temperatura, viento) y arquitectónicas (orientación, circulación del agua, capas posteriores) y puede variar

desde algunas horas hasta varios días en función de la evaporación del agua presente en el mortero. Este proceso conlleva una cierta retracción hidráulica.

El segundo proceso se basa en el contacto del CO_2 atmosférico con la solución del hidróxido cálcico, provocando la precipitación superficial de una fina película de carbonato cálcico. Al decrecer el contenido de agua (por evaporación) intersticial, se produce la rotura en varias partes de la capa carbonatada, provocando nuevos contactos con el CO_2 y difundiendo el mecanismo hacia el interior, produciéndose así el endurecimiento.

Los auténticos motores del proceso son la presencia de agua saturada de portlandita, su variación por evaporación y la presencia de CO_2 accesible, por tanto la porosidad y su forma tienen un papel importante (70) (71). La formación del carbonato de calcio conlleva un aumento de masa del 35% y un incremento de volumen muy pequeño, del orden del 11,7 %, que va disminuyendo la permeabilidad de la estructura sin conseguir normalmente obturarla. Así la variación alternativa del contenido de agua juntamente con el acceso del CO_2 a través de la red porosa va produciendo el proceso de carbonatación (46) (72) (68) (73). Al mismo tiempo, los repetidos procesos de mojado-secado producen la movilidad del hidróxido cálcico por lixiviación y por evaporación, lo que puede producir depósitos, una vez carbonatados, cercanos a la superficie o en la superficie.

Es conocido un original patrón de carbonatación, llamado patrón de Liesegang, en los morteros confeccionados con cal en pasta añeja. La carbonatación de la pasta añeja, tal como se puede estimar cualitativamente con la reacción cromática con fenolftaleína, pone de manifiesto que la carbonatación sigue una trayectoria compleja, discontinua y difusa de la que resulta una precipitación periódica de calcita, en forma de anillos, en oposición a lo que normalmente se esperaría de la carbonatación (por ejemplo, una trayectoria normal, de difusión limitada y continua, que progresa desde la superficie del mortero hacia su interior) (67) (68) (74). Las consecuencias de la formación de calcita según el patrón de Liesegang aún están por determinar, aunque la exploración mediante DRX parece explicar que la cal en pasta añeja carbonata antes que la pasta de cal. Es interesante constatar que patrones de Liesegang similares, con forma de anillos, se observan con cierta frecuencia en algunos morteros de cal antiguos que han sufrido una meteorización diferencial (Figura 31).

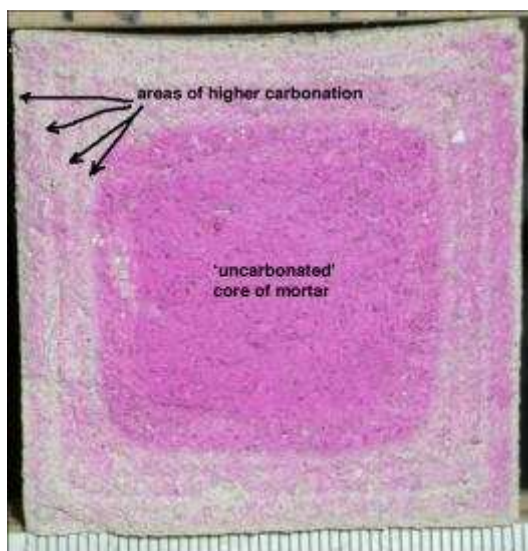


Figura 30 Ejemplo de líneas de Liesegang en el avance de la carbonatación de una probeta de mortero de cal aérea (75).



Figura 31 Imagen del resultado erosivo en un mortero de cal procedente de un contrafuerte centenario de la torre del pueblo de Tor, en Girona.

En procesos de carbonatación acelerada en cámara climática de CO_2 , en laboratorio, se han producido repetidamente perfiles de carbonatación (Figura 32) que maximizan el efecto en forma de un único anillo de zona no carbonatada alrededor de un núcleo carbonatado. Estos efectos se han dado tanto en morteros de cal aérea en polvo como en morteros de cal hidráulica, o en morteros mixtos cal-cemento, y también en algún mortero comercial predosificado (4) (2).

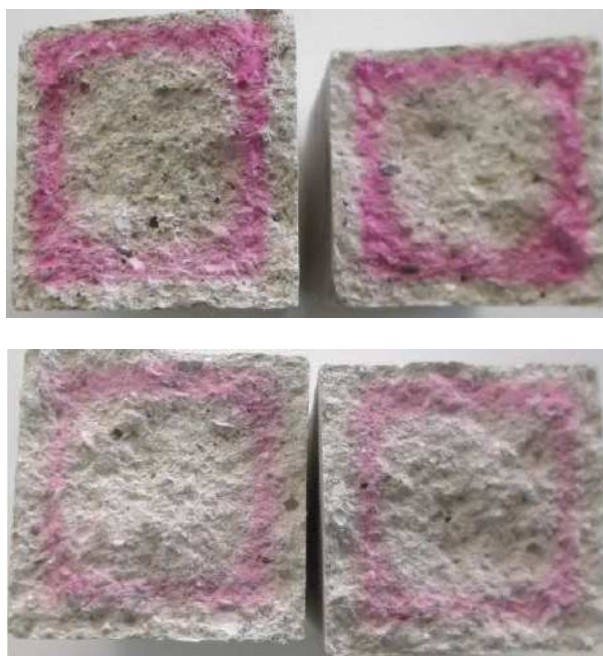


Figura 32 Resultado de la aplicación de una disolución alcohólica de fenolftaleína a la rotura reciente de una probeta de mortero mixto de cemento portland y cal aérea. Fuente (2).

3.2 Comportamiento reológico de las pastas

3.2.1 Introducción

El hecho de que una cal en pasta transforma su trabajabilidad a lo largo del tiempo es bien conocido como se desprende de las lecturas de los tratados tradicionales de construcción e incluso por las recomendaciones de los industriales. Los estucadores y demás profesionales del sector aprecian la bondad de una cal añeja a partir de la viscosidad “organoléptica” del producto, pero en general desconocen las transformaciones cristalinas que acontecen a lo largo del tiempo de envejecimiento. Esta bondad “a vista” de la cal en pasta se muestra, básicamente, en la untuosidad¹⁵, es decir:

- por una parte en la manera como la cal en pasta se adhiere o no a la superficie de la herramienta metálica (por ejemplo una espátula o un cuchillo): cuando la herramienta es retirada después de haber sido introducida en una pasta de cal añeja, el producto se adhiere y se produce la rotura por cohesión del material, mientras que al ser introducida en una pasta de cal joven la herramienta sale limpia, produciéndose un fallo por adherencia y no por cohesión.
- por otra parte por el tacto graso de la masa, que permite deformarla fácilmente con los dedos mientras conserva la compacidad.

Esta mayor “plasticidad”, argumentan los artesanos, permite “trabajar” mucho mejor el material, ya que las pastas y los morteros confeccionados con cal añeja se adhieren y extienden mucho mejor y no se descuelgan. Estas percepciones populares se pueden traducir hoy en día en el concepto general de “trabajabilidad”¹⁶ que comprende la moldeabilidad, la cohesión y la compactación de las pastas.

En el apartado 3.1.3 *Discusión del envejecimiento de la cal en pasta* ya hemos expuesto resumidamente el nivel de conocimiento actual de los procesos ocurridos durante el envejecimiento de la cal en pasta, en cuanto a los cambios que en ella se producen a nivel cristalino y de tamaño de partícula. Una segunda cuestión vinculada a la anterior es saber cómo se modifica el comportamiento reológico de la cal en pasta, cómo se puede medir, con qué herramientas y a partir de qué procedimientos.

Actualmente, la normativa europea en vigor aplicable a las cales para la construcción está pensada, discutida y desarrollada para cementos y para morteros de cemento. Aunque no es objetivo de este trabajo profundizar en las causas de este hecho, sí es necesario destacar que no existe normativa europea alguna que regule un procedimiento adecuado para medir la “plasticidad” de una pasta de cal. Y si bien es

¹⁵ Untuoso: graso y pegajoso; Diccionario de la lengua española; RAE Real Academia Española.

¹⁶ Trabajabilidad: Se considera como aquella propiedad mediante la cual se determina la capacidad del material para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna. Esta aceptación comprende conceptos tales como moldeabilidad, cohesión y compactación.

cierto que se regulan diferentes procedimientos para medir la consistencia de morteros frescos, y que recientemente se han estudiado diferentes procedimientos alternativos para medir su consistencia (76), para estudiar la plasticidad de las pasta de cal hay que recurrir a procedimientos “clásicos”.

El procedimiento “aceptado” más representativo para la medida de la plasticidad en cales lo encontramos en el *Plasticímetro Emley*. El Dr. Warren E. Emley es el precursor de la cuantificación de la plasticidad en las cales de construcción a partir de sus estudios y del desarrollo del aparato que permite medir una cierta plasticidad (77) (78), en el primer cuarto del siglo XX.

A él corresponde la definición: “Un material plástico es aquel que se trabaja libremente y con facilidad en la paleta y que posee una marcada capacidad de mantener el agua.” Emley consideraba la plasticidad de las pastas de cal pensando en aplicaciones de extendido en superficies con una cierta capacidad de absorción, como corresponde a las técnicas de aplicación en capas finales de revestimientos continuos, y por ello destacaba dos factores fundamentales:

- “... la plasticidad de un material depende directamente de su capacidad para retener el agua en contra de la absorción de la superficie a la cual se aplica”
- “... el material es más plástico cuando requiere menos trabajo para extenderlo”.

Para sus trabajos, Emley desarrolló durante más de 10 años hasta 20 prototipos diferentes de plasticímetros (79) a lo largo de los primeros años del siglo pasado, y finalmente el “Plasticímetro Emley”.

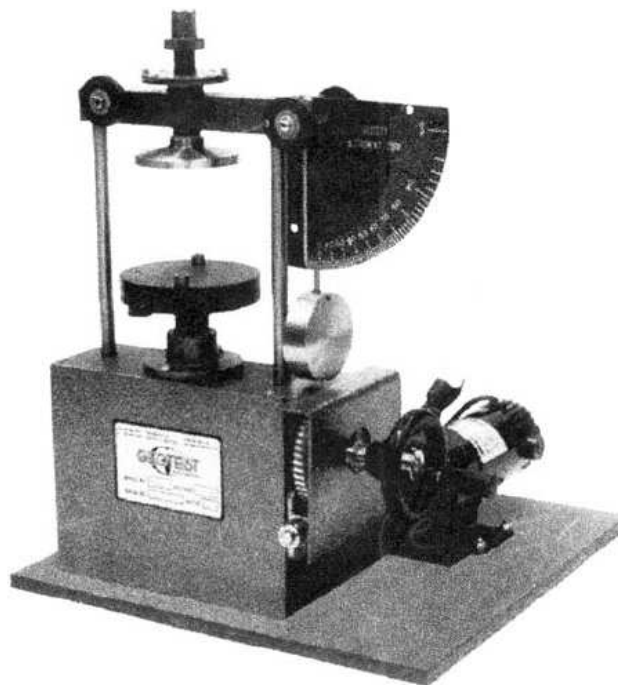


Figura 33 Imagen correspondiente al Plasticímetro Emley, extraída de la norma ASTM C 110 (80).



Figura 34 Imagen correspondiente a la parte superior del Plasticímetro Emley donde se observa el soporte poroso y la muestra objeto de ensayo (79).

El procedimiento de ensayo para la medida de la plasticidad utilizando el plasticímetro Emley, sin parangón en la normativa europea EN, queda descrito actualmente en la norma ASTM C 110 (80), y consiste en amasar con agua una cal hidratada siguiendo un estricto procedimiento y hasta conseguir una cierta consistencia Normal, definida por asentamiento de la sonda de Vicat. Con esta pasta se conforma una probeta cilíndrica, adaptada a una placa base de absorción estandarizada.

Se somete el conjunto placa-probeta a la acción mecánica del plasticímetro consistente en el giro de la placa base y su ascenso vertical a velocidad constante, generando un movimiento helicoidal. En este movimiento la muestra se ve sometida a un esfuerzo de compresión y de torsión, a la vez que se produce la desorción. El esfuerzo torsor es soportado por la placa superior y es cuantificado a partir de un ingenioso sistema de transmisión. El operador de la máquina registra la escala de valores que indica el grado de rigidez en intervalos de 1 minuto hasta el final del ensayo. La prueba se considera terminada cuando se dan alguna de las tres condiciones:

- 1) la lectura de la escala alcanza el valor 100;
- 2) cualquier lectura es menor que la anterior, o bien,
- 3) la lectura de la escala se mantiene constante durante tres lecturas consecutivas y la muestra se ha roto visiblemente o desprendido de la placa base.

Como se muestra en la expresión siguiente, el valor de la plasticidad resultante (P) en unidades Emley, es función de la fuerza (F) en lecturas de la escala del aparato y el tiempo transcurrido (T) en minutos desde el inicio de las medidas.

$$P = \sqrt{F^2 + 10T^2}$$

Nótese que el procedimiento Emley incluye, como factores, la absorción de un soporte “normalizado” y un contenido de agua de la pasta definido por una consistencia dada. Así una cal presentará bajos valores de P (Emleys) si pierde rápidamente el agua, lo que comporta la rigidización de la pasta. Aunque este hecho dificulta su aplicabilidad como herramienta de investigación de la naturaleza de la cal, sí resulta apropiado para una tipificación a efectos de definir su calidad. En este sentido, la normativa ASTM C110 - 11 (80) estipula, entre sus exigencias para la clasificación de las cales, resultados de plasticidad Emley. (Tabla 7).

Hay estudios (79) que muestran problemas de reproducibilidad de las medidas realizadas con este aparato.

Requirement	C 206 – finishing plaster		C 207 – mortar	
	Type N	Type S	Type N	Type S
Chemical Properties:				
Calcium and magnesium oxides (non-volatile basis), min. %	95	95	95	95
Carbon dioxide, min. %	5	5	5	5
Unhydrated oxides, max. %	no value assigned	8	no value assigned	8
Physical Properties:				
No. 30 mesh (600 µm), max. %	0.5	0.5	0.5 or if greater no pits or pops	0.5 or if greater no pits or pops
No. 200 mesh (75 µm), max. %	15	15	no value assigned	no value assigned
Pits or pops	none	none	Not applicable unless No. 30 mesh >0.5%, then none.	Not applicable unless No. 30 mesh >0.5%, then none.
Plasticity, min. Emley value	200 after 16 h soak	200 within 30 min.	no value assigned	200 within 30 min.
Water retention, min. %	no value assigned	no value assigned	75 after 16 h soak	85 within 30 min.

Tabla 7 Especificaciones ASTM (80) correspondientes a los tipos de cales hidratadas en polvo N y S.

Algunos aspectos referidos a la plasticidad, a la evolución histórica de su medida, a la retención de agua y a los tipos S (ASTM) de cal se encuentran en un estudio de Margaret L. Thomson, 2005. (81)

3.2.2 Fundamento teórico de la medida de la viscosidad

La reología es la ciencia que estudia la relación entre las deformaciones y las tensiones que pueden experimentar los materiales en sus diferentes estados. Desde el punto de vista experimental, la caracterización del comportamiento reológico de los materiales consiste en la medición de las deformaciones producidas por unas tensiones aplicadas o la constatación de la velocidad de deformación como consecuencia de dichas tensiones.

Los primeros conocimientos de esta disciplina se sitúan en la segunda mitad del s. XVII (Robert Hooke, Verdadera teoría de la elasticidad.) (Isaac Newton, “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”). Hasta mediados del s. XIX los estudios relacionados con la reología se limitaron a aplicar la Ley de Newton para los líquidos y la Ley de Hooke para los sólidos. Fue entonces cuando Weber (1835) y Maxwell (1867) dieron el siguiente paso en lo que vino a denominarse posteriormente “viscoelasticidad”.

A partir de la II Guerra Mundial nuevamente se produjeron avances en la reología como consecuencia de la necesidad de encontrar materiales viscoelásticos para las armas lanzallamas. Se avanzó en el hecho de la dependencia de la viscosidad con el tiempo. Así se empezó a estudiar la tixotropía y la reopexia. Deborah (1945) definió un modelo que permitía distinguir entre materiales sólidos elásticos y líquidos viscosos.

Posteriormente y con la progresiva aparición de materiales y procesos de conformación más “modernos” se incrementó el interés por la reología (plásticos, fibras sintéticas, detergentes, aceites multigrado, adhesivos, pinturas).

A continuación se presentan de forma esquemática los principios básicos que explican los conceptos de viscosidad y algunos modelos de comportamiento asociados.

Consideremos que un determinado volumen de un material fluido se limite entre dos placas paralelas. Al someter este fluido a un esfuerzo cortante se produce una deformación del mismo.

Al aplicar la fuerza al plano de una de las placas, ésta transmite un esfuerzo tangencial a la superficie de contacto del fluido. Éste se desplaza formando un flujo laminar de la parte de fluido comprendida entre ambas placas, como se indica en la Figura 35, lo que significa que las capas de espesor diferencial se deslizan una sobre otra, de tal manera que la capa en contacto directo con la placa en movimiento presenta una máxima velocidad (V), mientras que la capa más cercana a la placa que no se desplaza permanece inmóvil. Se produce por tanto un gradiente de velocidad de desplazamiento a lo largo del espesor del fluido entre las capas (d). Este gradiente de velocidades es la velocidad de deformación de corte de un fluido.

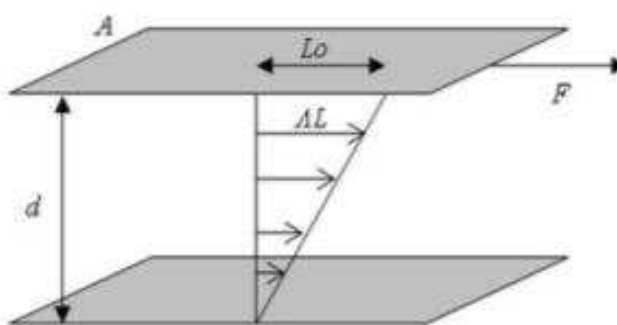


Figura 35 Modelo esquemático que ilustra el movimiento de un fluido al aplicar un esfuerzo cortante.

Donde el esfuerzo cortante¹⁷ es:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{N/m}^2]$$

y la velocidad de deformación¹⁸ entre partículas de capas es:

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{d} \quad [1/\text{sg}]$$

Ley de Newton de la viscosidad

Los líquidos puros y homogéneos de bajo peso molecular así como los gases, se comportan de acuerdo con la ley de Newton, la cual viene representada, en coordenadas rectangulares, por la siguiente expresión:

$$\tau = -\mu \frac{dV}{dy} \quad [7]$$

es decir, el esfuerzo cortante a que se somete un fluido, es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local del material, y esta constante de proporcionalidad es conocida por viscosidad¹⁹. Los fluidos que cumplen esta ley, en la que la viscosidad es constante, se denominan fluidos newtonianos. De acuerdo con esta ley, al representar gráficamente el esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidad, para un fluido determinado, se obtiene una línea recta que pasa por el origen de coordenadas y cuya pendiente a una cierta temperatura y presión, es la viscosidad del fluido (Figura 36).

Sin embargo, existen muchos materiales que no se comportan de forma coincidente con la ley de Newton. Son los llamados fluidos no-newtonianos. Para estos materiales el comportamiento de los esfuerzos cortantes a diferentes gradientes de velocidad, puede establecerse mediante una fórmula generalizada:

$$\tau = -\mu_a \frac{dV}{dy} \quad [8]$$

en la que μ_a es denominada viscosidad aparente, y puede expresarse como una función del gradiente de velocidad o del esfuerzo cortante, indistintamente, y puede aumentar o disminuir con el incremento del gradiente de velocidad.

La viscosidad aparente se define de acuerdo con la ecuación [9]:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_a} \quad [9]$$

¹⁷ También se conoce como esfuerzo de cizalla, tensión tangencial, fuerza superficial, tensión de cizalla, tensión de corte y en inglés "shear stress".

¹⁸ También conocida como velocidad de corte, velocidad de cizalla y en inglés "shear rate".

¹⁹ En este caso nos referimos más concretamente a la viscosidad dinámica o viscosidad absoluta

Donde:

$$\dot{\gamma}_a = -\frac{dV}{dy}$$

Modelos utilizados para fluidos no-newtonianos

La *curva de flujo* o *curva de fluidez*, que corresponde a la representación cartesiana del esfuerzo cortante (τ) frente a la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), de los fluidos no-newtonianos no es lineal, y si es lineal no pasa por el origen de coordenadas. Diferentes modelos matemáticos describen la relación que existe entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo cortante; de estos modelos, los más utilizados entre otros son: el modelo de Ostwald de Waele para fluidos pseudoplásticos, el de los plásticos Bingham o Casson, y el de Herschel-Bulkley, entre otros (Figura 36).

En los casos de fluidos plásticos, pseudoplásticos²⁰ o dilatantes²¹, la viscosidad entendida como la pendiente de la tangente a la curva de fluidez en cada punto, se conoce como viscosidad aparente (η_a).

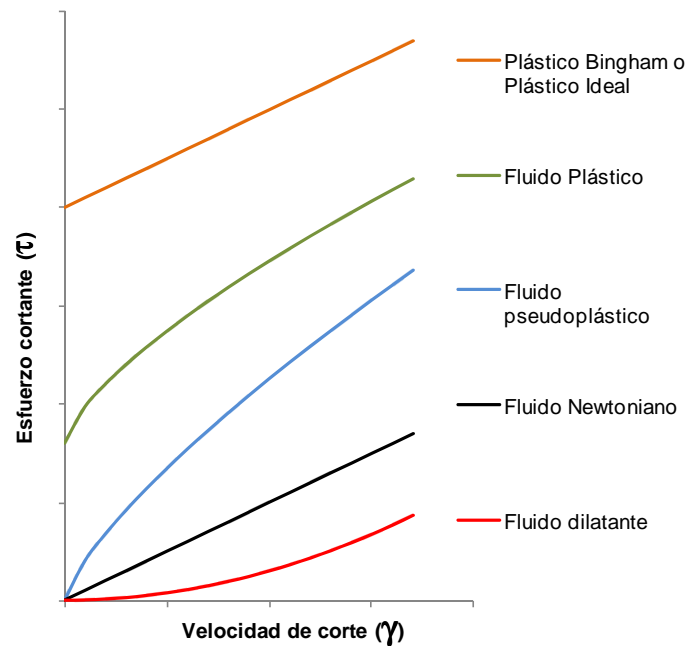


Figura 36 Curvas de fluidez para diferentes modelos de comportamiento de fluidos.

²⁰ También conocidos por fluidos adelgazantes, en inglés “shear-thinning”

²¹ También conocidos por fluidos engrosamiento, en inglés “shear-thickening”

El modelo de ley de potencia de Ostwald-de-Waele puede modelar fluidos pseudoplásticos cuando el exponente (**n**) que caracteriza la ley es menor que uno. Algunos ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: pinturas, gomas, sangre, suspensiones, etcétera.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n < 1$$

Fluido pseudoplástico

Esta ley modela los fluidos newtonianos cuando (**n**) es igual a uno, y los fluidos dilatantes cuando (**n**) es mayor que uno. Como ejemplos de estos fluidos, se pueden citar, entre otros, la tierra húmeda y las suspensiones de almidón de maíz o de arroz.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n = 1$$

Fluido Newtoniano

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n > 1$$

Fluido dilatante

Los casos en los que es necesaria una cierta tensión de corte umbral²² (τ_0) para iniciar el desplazamiento se pueden modelar con distintas expresiones, por ejemplo las siguientes:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n < 1$$

Fluido plástico

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n = 1$$

Fluido plástico Bingham

Teniendo en cuenta que las dispersiones de cal en agua (pastas de cal o cales en pasta) se ajustan suficientemente al modelo de Ostwald de Waele, como constataremos más adelante, sólo haremos énfasis en las características de los fluidos que se ajustan a dicho modelo.

Este modelo viene expresado por la relación:

$$\tau = K |\dot{\gamma}|^n \quad [10]$$

²² La tensión de corte umbral corresponde a aquella tensión hasta la cual los fluidos se comportan como sólidos. Superada esta tensión se comportan como líquidos, fluyendo a una cierta velocidad de deformación. Estas sustancias se denominan viscoelásticas.

Esta expresión se conoce también como ley de Potencia. En este modelo, **K** es denominado *índice de consistencia* y **(n)** *índice de flujo* e indica cómo se aleja de un fluido newtoniano. Para los fluidos que se ajustan a este modelo la definición de viscosidad aparente dada por la ecuación [9] se expresa por:

$$\mu_a = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad [11]$$

La expresión gráfica de los modelos se muestra a continuación en la Figura 37 y la Figura 38.

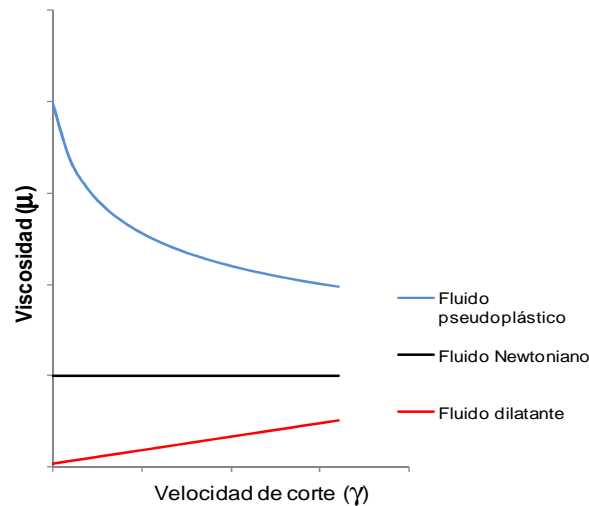


Figura 37 Curvas de viscosidad para diferentes modelos de comportamiento de fluidos.

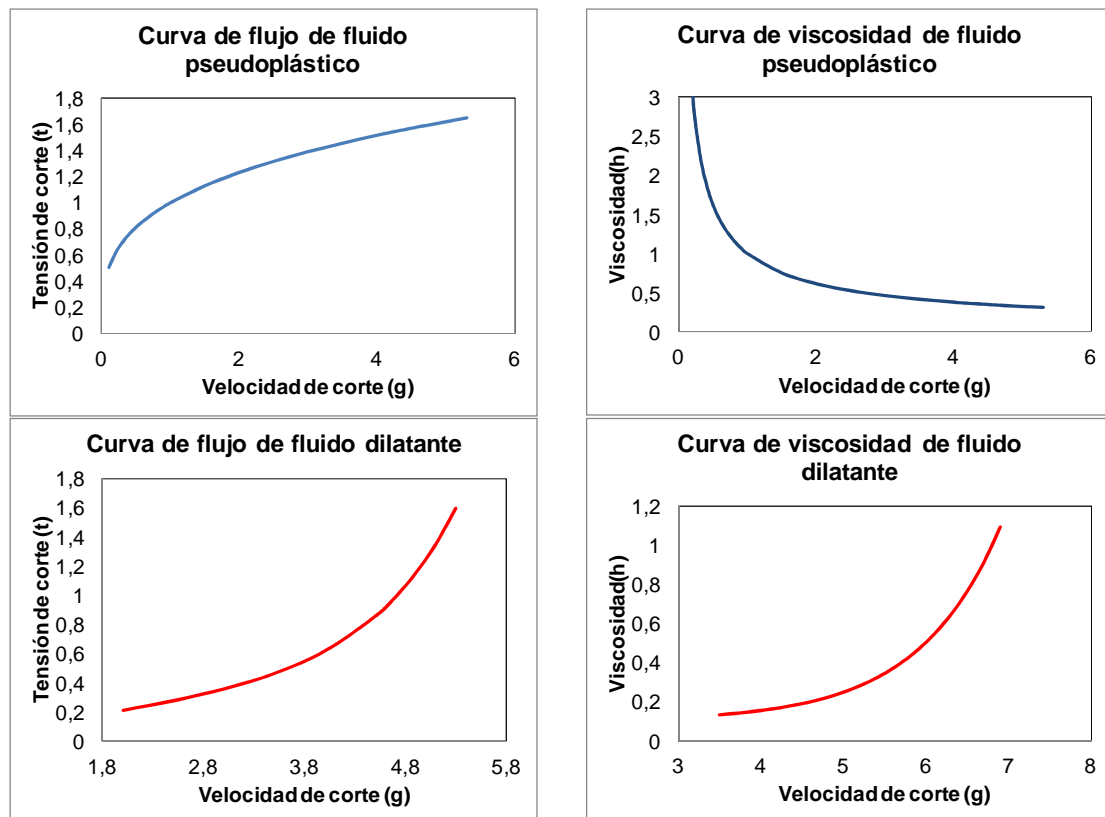


Figura 38 Curvas de flujo y de viscosidad para fluido pseudoplástico y dilatante.

Pero los comportamientos descritos anteriormente no consideran variaciones en la respuesta del fluido en función del tiempo transcurrido de aplicación del esfuerzo cortante. Cuando los fluidos son sensibles a esta variable (tiempo de aplicación), los denominamos tixotrópicos o reopéxicos²³ (Figura 39).

Los fluidos tixotrópicos son aquellos en los cuales disminuye la viscosidad con el paso del tiempo mediante la aplicación del esfuerzo cortante necesario para mantener una velocidad de deformación constante, recuperando su estado inicial después de un prolongado reposo.

Los fluidos reopéxicos, en cambio, aumentan su viscosidad con el paso del tiempo al aplicar el esfuerzo cortante necesario para mantener la velocidad de deformación constante. También en este caso vuelven a su estado anterior una vez transcurrido suficiente tiempo de reposo.

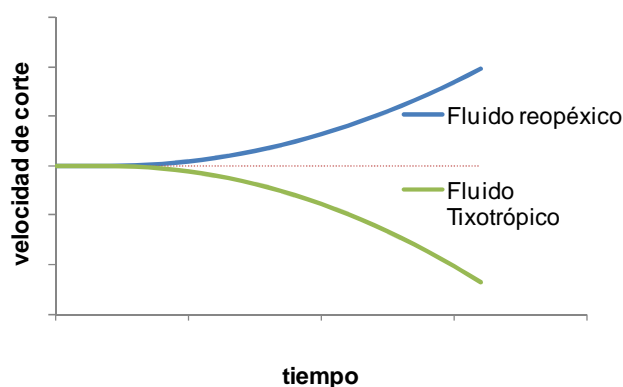


Figura 39 Curvas correspondientes a los comportamientos reopéxico y tixotrópico de algunos fluidos al aplicarles un esfuerzo de corte constante.

Estas características las podemos también constatar en la histéresis entre las ramas ascendentes y descendentes de una curva de flujo (Figura 40).

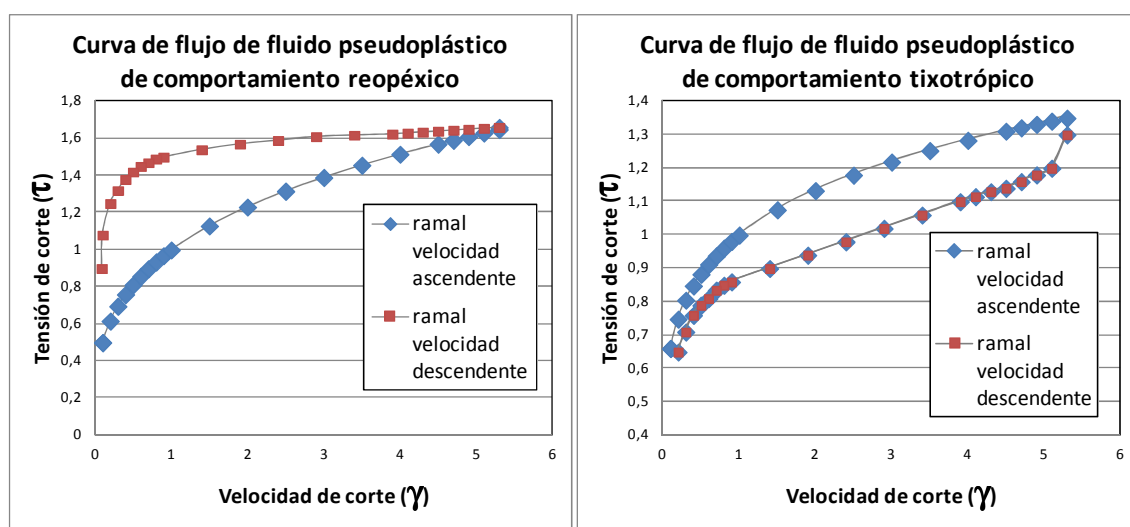


Figura 40 Curvas de flujo de un fluidos pseudoplásticos de comportamientos reopéxico y tixotrópico.

²³ El diccionario de la RAE no contempla los términos “tixotropía” ni “reopéxia”.

Algunos valores aproximados de viscosidad para diferentes materiales se encuentran en la (Tabla 8). Las pastas de cal se encuentran en valores entre 10^3 y 10^4 mPa·s.

Fluido	Viscosidad (mPa.s)
Vidrio fundido	10^{15}
Betún	10^{11}
Polímeros fundidos	10^6
Miel líquida	10^4
Glicerina	10^3
Aceite de oliva	10^2
Agua	1
Aire	10^{-2}

Tabla 8 Valores de viscosidad de diferentes sustancias.

3.2.3 Factores que rigen la reología de las pastas

El comportamiento reológico de las pastas, entendido como los principios físicos que regulan su movimiento, depende de multitud de factores, básicamente agrupables en cuatro apartados:

- Tamaños y distribución de tamaños de partículas.
- Forma de las partículas y de sus superficies.
- Potencial Z de la dispersión.
- Concentración de la dispersión.

• Tamaño y distribución de las partículas

A menores tamaños de partículas, generalmente la viscosidad aumenta, ya que para una concentración determinada se incrementa el número de partículas y en consecuencia la cantidad de interrelaciones entre ellas. Al tratarse de fuerzas de escasa intensidad, su efecto se manifiesta más a menores velocidades de deformación.

La distribución de porcentajes de diferentes tamaños de partículas también juega su papel en la viscosidad dado que cuanto más reducida es la distribución, las partículas se empaquetan peor, se reduce el espacio libre entre partículas y por tanto, mayor es la viscosidad.

• Forma y superficie de las partículas

En cuanto a la forma de las partículas y de sus superficies, las partículas más “esféricas” presentan un comportamiento tipo pseudoplástico, mientras que las partículas “aciculares” o “laminares” pueden conducir a un valor más elevado de esfuerzo cortante necesario para iniciar el flujo (τ_0), debido a su orientación aleatoria. Una vez iniciado el flujo, las partículas pueden orientarse en la dirección de éste disminuyendo la viscosidad.

Además, las partículas de superficies más lisas oponen resistencia al movimiento como consecuencia de la asociación entre ellas, mientras que las de superficies más “rugosas” oponen resistencia mecánica. Las partículas de superficies rugosas suelen presentar un punto de fluencia superior y una viscosidad a baja velocidad superior.

● **Potencial Z de la dispersión**

El potencial Z mantiene las partículas (las menores) separadas en función de su intensidad (independientemente de su signo), hasta un umbral de proximidad en el que se entra en la “Trampa de Energía” consecuencia de la suma de esta energía repulsiva (potencial Z) y la energía de atracción consecuencia de las fuerzas de Van der Waals. Este fenómeno se conoce como balance de Repulsión-Atracción y queda explicado en la teoría DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek).

Para los casos de partículas “grandes” o concentraciones elevadas, la fuerza de la gravedad sobre las propias partículas con menor movimiento cinético superará la fuerza de repulsión entre ellas. Sin embargo, como estas partículas ya no pueden agregarse completamente debido a la capa de hidratación, se puede producir un incremento de viscosidad a velocidades de deformación pequeñas como consecuencia de la fuerza de atracción.

● **Concentración de la dispersión**

Finalmente, en cuanto a la concentración de la dispersión, si ésta aumenta, lógicamente aumenta la viscosidad en tanto que disminuye el espacio libre entre partículas. Pero además puede variar el tipo de comportamiento, de newtoniano para el caso extremo de menor concentración a pseudo-plástico y a dilatante para los casos de mayores concentraciones.

3.2.4 Estudios anteriores de reología de pastas de cal

Se conocen pocos trabajos específicos que desarrollen aspectos relacionados con el comportamiento reológico de las pastas de cal. Desde un punto de vista actual hemos considerado aquellas publicaciones que utilizan herramientas de medida como los rotoviscosímetros y los reómetros.

A nuestro entender el trabajo más relevante a considerar como punto de partida es el de **Atzeni et al.** (82) que estudia dos cales en pasta de diferentes antigüedades (3 meses y 3 años) y una pasta de cal recién confeccionada a partir de una cal cálcica (CL) en polvo.

A nivel metodológico Atzeni ensaya cales en pasta con concentraciones cercanas al 50 %, mide viscosidad con un viscosímetro rotacional (Rotovisko Haake) dotado de cilindros coaxiales ranurados, trabaja en cinco velocidades de 9 a 243 r.p.m. y adopta el valor del esfuerzo cortante aplicado a los 12 minutos (720 segundos).

Con ello, constata cómo los datos medidos (τ , t), (Figura 41), se adaptan muy bien a un modelo de Tattersall (83) y cómo la curva de fluidez (τ , γ) se corresponde con los fluidos Plásticos de Bingham. El trabajo concluye con la validez de los parámetros (τ , t) y (τ , γ) como herramienta eficiente para evaluar las diferencias de comportamiento

entre distintas pastas de cal con similar composición mineralógica y con idéntica concentración.

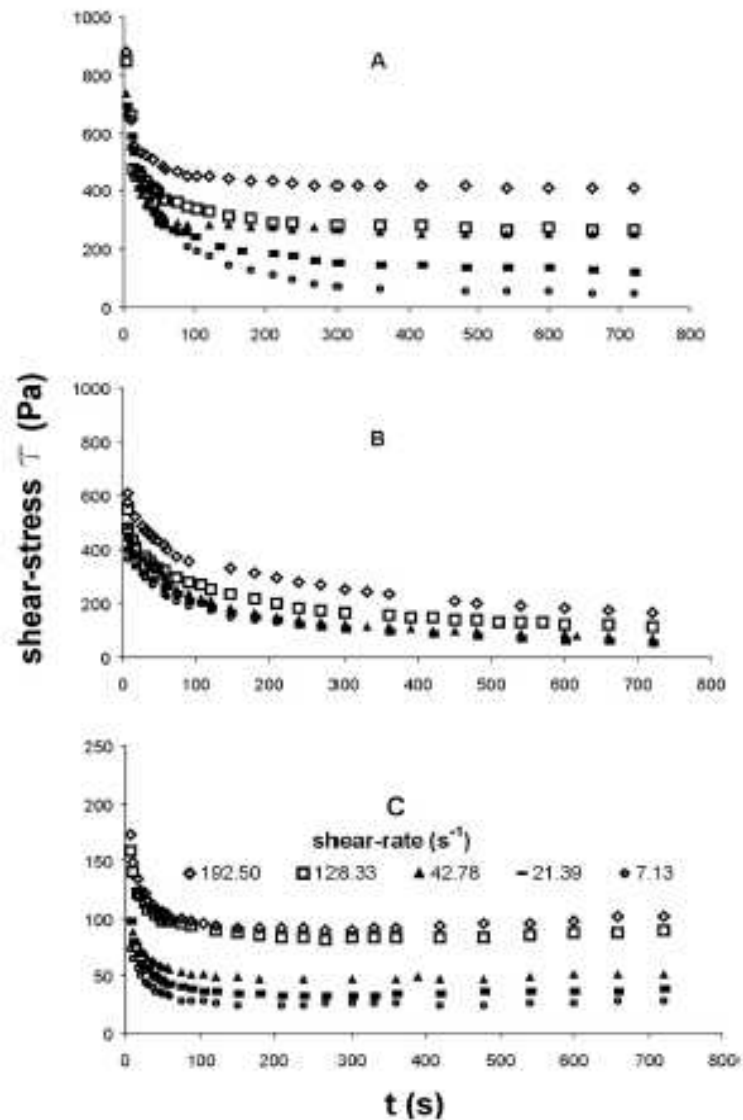


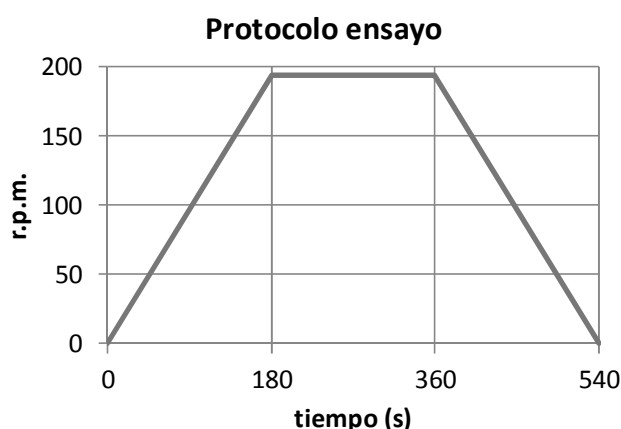
Figura 41 Medidas de esfuerzo cortante aplicado a diferentes cales (A) cal en pasta añeja de gres años, (B) cal en pasta añeja de tres meses (C) cal recién apagada, y a diferentes velocidades a lo largo de 720 segundos. Obtenido de (82)

Publicado en paralelo, el trabajo de **Sébaïbi et al.** (84) estudia las aportaciones al comportamiento de pastas mixtas cal-cemento de diferentes porcentajes de sustitución del cemento por diferentes cales, y cómo ello influye en la demanda de agua para mantener una consistencia constante. Los resultados muestran la mayor relevancia de las características morfológicas de las cales por encima de las diferencias composicionales.

Las medidas de viscosidad en las pastas se realizaron con reómetro Brookfield DV-III equipado con un husillo HB-6, pero utilizado a una única velocidad constante de 10 r.p.m.

En los trabajos de **Ruiz-Agudo** y **Rodríguez-Navarro**, que han dado lugar a diferentes publicaciones relacionadas con la reología de las cales (85) (86) (56), se estudia el comportamiento reológico de cales en pasta.

Por una parte se estudia la reología de una cal en pasta realizada en laboratorio a partir de un óxido artesanal, utilizando un reómetro con cilíndricos coaxiales ranurados. La rutina se describe como un aumento lineal de la velocidad de giro de 0 a 193,65 rpm durante 180 segundos, un período de velocidad constante (193,65 rpm) y una desaceleración lineal de 193,65 a 0 rpm a lo largo de otros 180 segundos.



Se realizaron mediciones a diferentes edades desde 3 h hasta 8 meses (86). Se presentan distintas conclusiones:

La pasta de cal estudiada se comporta como un fluido no newtoniano con un comportamiento complejo que depende del gradiente de esfuerzo aplicado, que no se puede abarcar con un solo modelo como sugiere Atzeni et al. (82).

Las variaciones de resultados en relación a la evolución en el tiempo de la cal en pasta se relacionan con la propia evolución de la morfología de los cristales, de laminares a prismáticos y de nuevo a laminares.

Durante el reposo de la pasta, los cristales laminares se “ordenan” paralelos con el eje principal horizontal, lo que dificulta su flujo. Cuando la estructura en reposo se rompe, el flujo se facilita y la viscosidad decrece. Una vez en movimiento, la estructura tiende a estabilizarse en una configuración desordenada conocida como “castillo de naipes”, la cual dificulta el flujo aumentando la viscosidad a medida que aumenta la velocidad de cortante. Para valores de velocidad elevados, por encima de un valor crítico, las fuerzas de cortante superan las fuerzas electrostáticas, la estructura se rompe y las partículas se alinean con el flujo, disminuyendo la viscosidad. Pasado este período, al disminuir la velocidad las partículas tienden a formar nuevamente una estructura de “castillo de naipes” y no la estructura laminar horizontal inicial, propia del estado de reposo.

Quizás la conclusión más sorprendente de este trabajo, por lo contradictoria con la bibliografía tradicional de la construcción, sea:

“Las mejores propiedades reológicas se alcanzan inmediatamente después del apagado, cuando el tamaño de partícula es más pequeño y los cristales tienen forma laminar. Estos efectos positivos duran hasta dos días después del apagado. De lo contrario, la pasta de cal requiere un tiempo de envejecimiento para recuperar dichas propiedades óptimas iniciales.”

Un segundo trabajo de análisis (85) con la misma única cal e idéntica rutina en lo referente a medida de viscosidad se encaminó a conocer el efecto de la adición de un aditivo lignosulfonato de calcio (0.001 M) en la reología de la pasta. Se distinguieron dos situaciones distintas en cuanto a la adición del aditivo: inmediatamente después del apagado; e incorporado en el agua justo antes de ser ésta añadida al óxido para el apagado.

Este estudio muestra cómo el aditivo actúa dificultando el agrupamiento de los cristales, por efecto de sus propiedades hidrofóbicas al situarse intra partículas, y también en el proceso de sedimentación posterior al apagado ya que tiende a formar pastas densas, con lo que éstas resultan más viscosas.

El trabajo más interesante de este grupo (56) se basa en comparar los resultados de dos cales en pasta realizadas en idénticas condiciones, partiendo de un óxido de origen artesanal FGP y otro industrial ACP, provenientes ambos de la misma región. Metodológicamente se miden algunas propiedades reológicas a partir de los ensayos con reómetros de cilindros coaxiales ranurados a muy cortas edades (6 horas después del apagado) y de forma diferida a lo largo de más de un año, con las rutinas de giro descritas en (Figura 42).

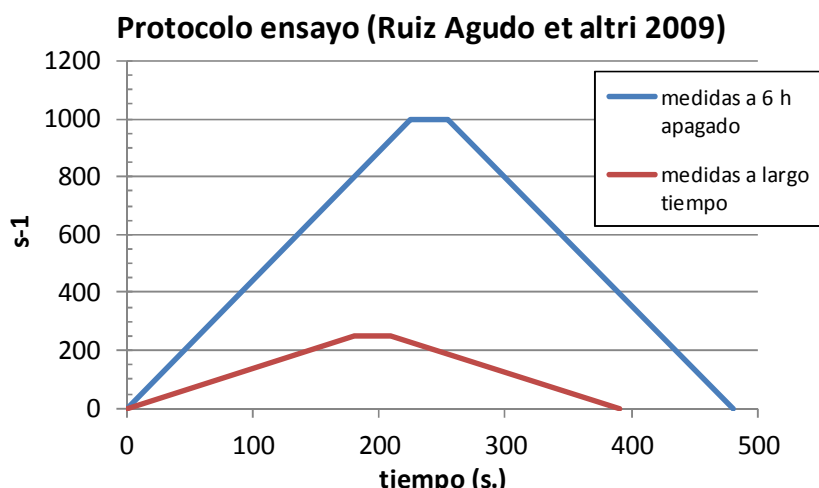


Figura 42 Rutinas de aplicación del esfuerzo de corte con reómetro con cilindros coaxiales ranurados.

Las principales conclusiones se centran en:

A bajas velocidades de corte (correspondientes a trabajos de tipo manual como amasar, extender con llana, etc.) el comportamiento es claramente no-Newtoniano, mientras que a altas velocidades de corte, las cales en pasta estudiadas se comportan

casi como un fluido Newtoniano. Se ajustan modelos a ambos comportamientos (Figura 43).

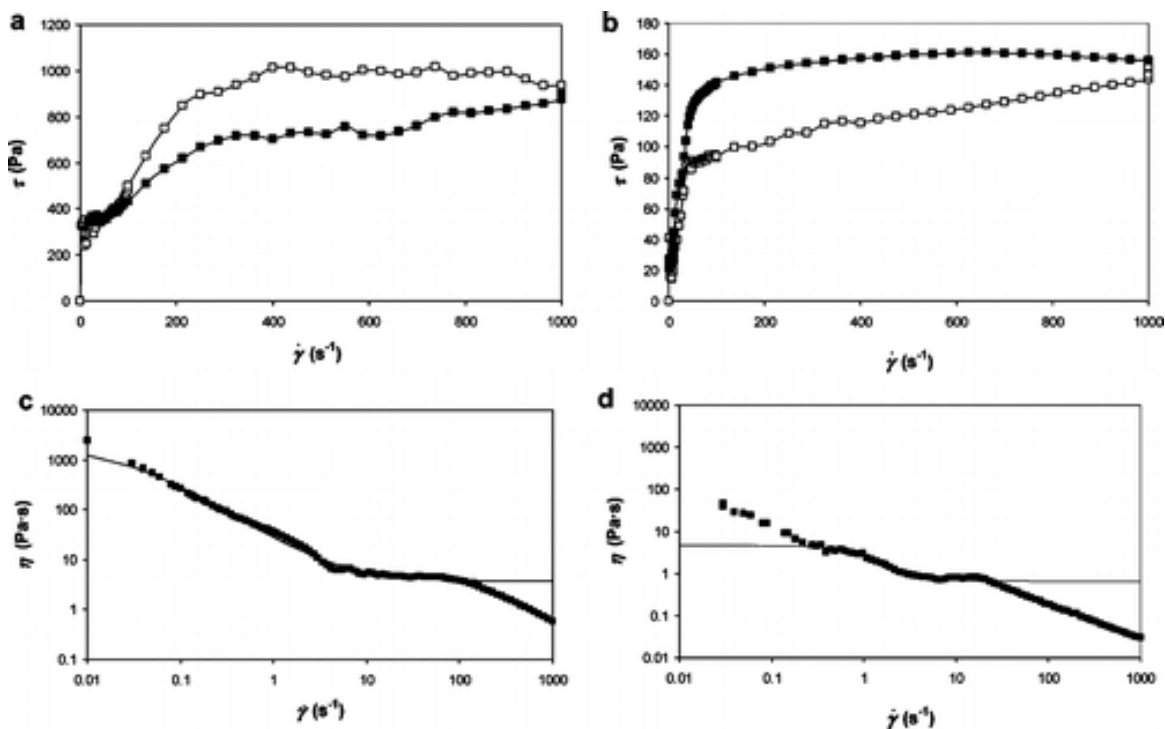


Figura 43 Curvas de flujo para (a) FCP y (b) ACP con una fracción de volumen alrededor de 0,17 (\square es rama ascendente, \blacksquare corresponde a rama descendente). Representación log-log de la viscosidad vs velocidad de cizalla y línea de ajuste (56).

En la cal de producción artesanal FGP, de menor reactividad (Figura 27), y después de un período de corte a una velocidad constante, se observa una disminución de la viscosidad con respecto a la viscosidad determinada por la tasa creciente de la curva de flujo (Figura 43), lo que corresponde a un comportamiento tixotrópico. En contraste, la cal industrial ACP se comporta como un fluido reopéxico.

En cuanto a la evolución en el tiempo, la FGP inicialmente mostró una alta viscosidad, que disminuyó de forma relativamente rápida hasta alcanzar valores mínimos después de algunas semanas de tiempo de envejecimiento. Posteriormente, la viscosidad tendió a aumentar de nuevo después de almacenamiento a largo plazo (es decir, más de un año de envejecimiento) (Figura 44). Una tendencia similar se observó en el caso de tensión umbral de corte (σ_0) en función del tiempo de envejecimiento. Por el contrario, la viscosidad y tensión umbral de ACP aumentó continuamente con el tiempo transcurrido.

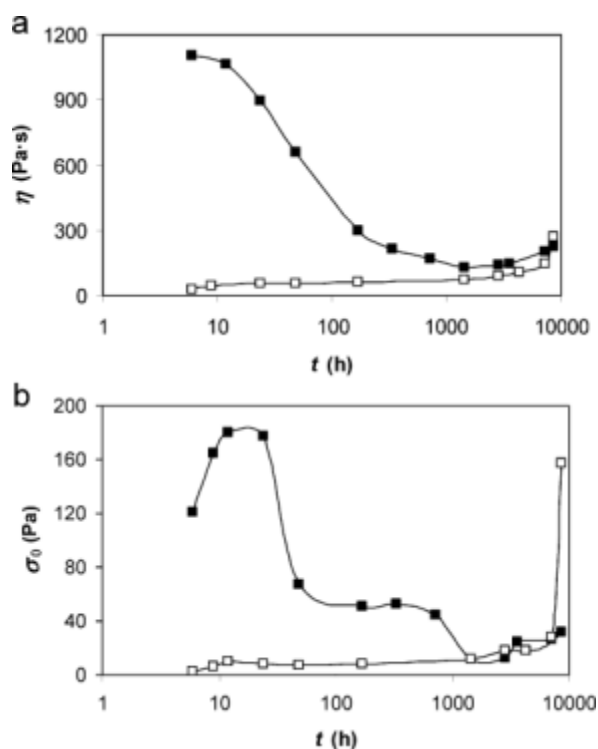


Figura 44 Efecto del tiempo de envejecimiento (t) en el esfuerzo cortante aplicado (a) a la velocidad de deformación constante $\dot{\gamma}=250\text{s}^{-1}$ y (b) de fluencia (σ_0) de la FGP (■) y ACP (□).

Así pues, este trabajo presentaba unos resultados de comportamiento reológicos claramente diferentes a los esperados tradicionalmente. Por una parte la pasta de cal proveniente de la producción artesanal (FGP) de Francisco Gordillo en Morón de la Frontera, en Sevilla, (ver 4.2 *Materiales utilizados*), presentaba mayores viscosidades a muy cortas edades y iba perdiendo viscosidad con el paso del tiempo. Por otro lado, la cal de producción industrial (ACP) de Andaluza de Cales, y también de Morón de la Frontera, presentaba menores viscosidades a corto plazo, pero mejoraba (aumentaba) con el tiempo. Esto no es óbice para constatar que para todas las edades estudiadas siempre presentó mayores viscosidades FGP respecto de ACP, igualándose éstas al cabo de un año.

El último de los trabajos publicados y consultados fue el de **Arizzi et al.** (87), en el que se compara el comportamiento reológico de pastas de cal realizadas con dos cales en polvo de origen industrial, una calcítica (CL) (española) y la otra dolomítica (DL) (estadounidense).

En estos trabajos, se caracterizan los materiales originales y las pastas con ellos generadas con diferentes técnicas: superficie específica BET, distribución de tamaño de partículas PSD, microscopía electrónica de barrido y de transmisión de alta resolución, potencial ζ , etc.

En lo referente a las medidas reológicas se utilizan diferentes reómetros y se trabaja con diferentes concentraciones para la CL y la DL (Figura 45).

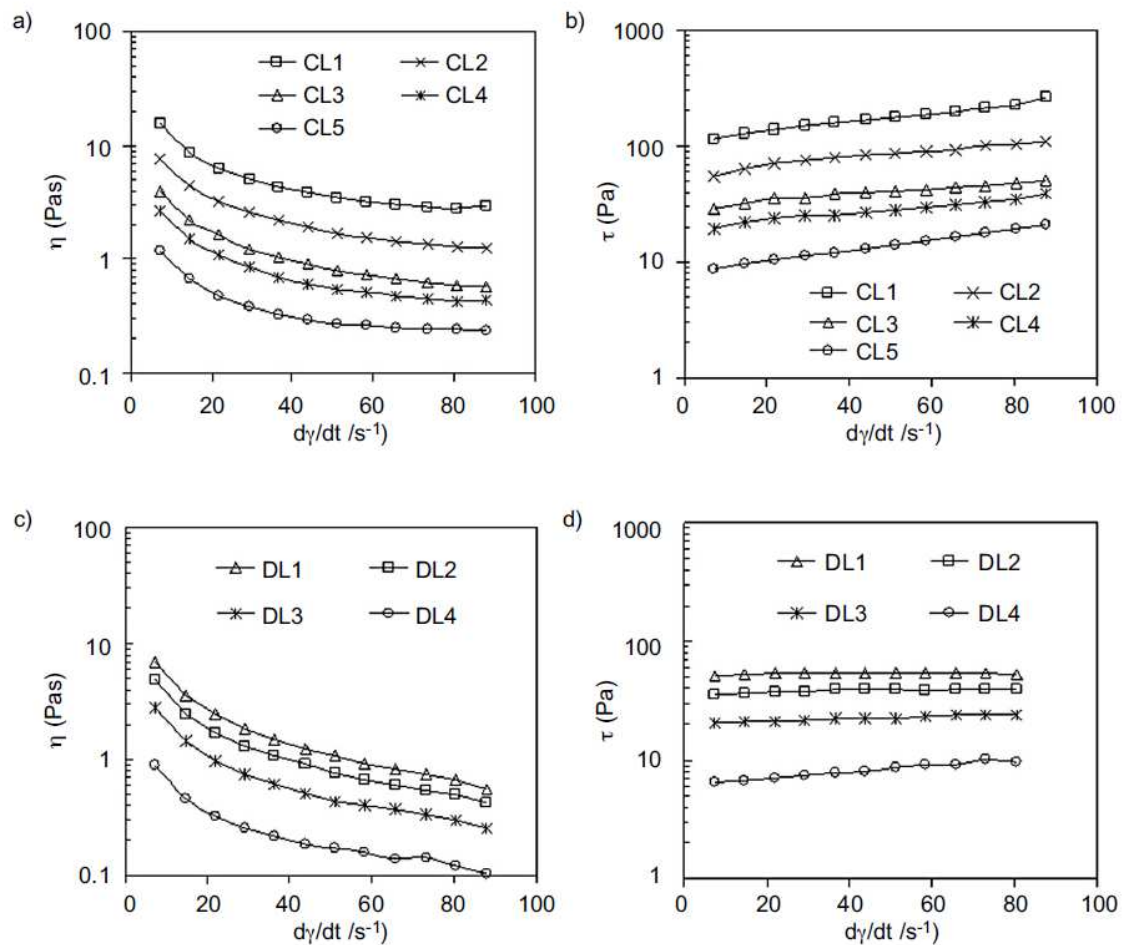


Figura 45 Curvas de flujo y de viscosidad de una cal CL y otra DL para distintas concentraciones.

La conclusión más sorprendente que se desprende de este trabajo, y vista desde un país en el que no se produce, de forma significativa, cal dolomítica DL, donde se prefieren las cales en pasta de gran viscosidad y donde se conocen las cales con brucita como “cales magras”, es la proposición:

“Desde un punto de vista práctico, la cal dolomítica presenta un comportamiento más apropiado para la aplicación de un mortero, pues daría lugar a una resistencia constante durante la aplicación, cualquiera que sea la fuerza y velocidad empleada”.

Y aún más:

“Así se explica la preferencia tradicional de morteros de cal dolomítica para aplicaciones en revocos exteriores e interiores”.

Un reciente trabajo de interés de **Lassinantti et al.** (88), aún no publicado, pero proporcionado directamente por uno de los autores, estudia 11 diferentes cales con reómetro rotacional y viscosímetro, aplicando diferentes rampas y escalones de velocidad.

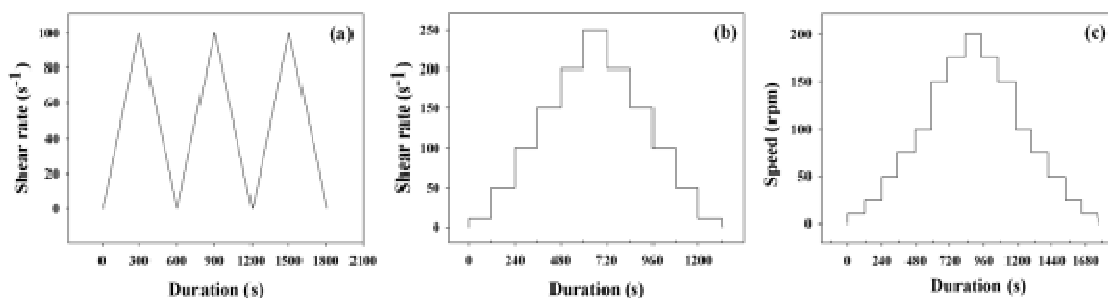


Figura 46 Procedimientos reológicos de medición aplicados (88).

Los procedimientos reológicos de medición aplicados fueron, de acuerdo con la Figura 46:

- La tasa de corte se incrementó linealmente desde 0 hasta 100 s^{-1} , para luego disminuir de forma lineal a 0 (Haake RS-1). El ciclo de las tasas de corte se repitió dos veces, y la duración de cada ciclo fue de 10 minutos;
- La tasa de corte se incrementó en pasos de 50 s^{-1} de 0 s^{-1} a 250 s^{-1} y de nuevo a 0 s^{-1} . Después de cada paso, la tasa de corte se mantuvo constante durante 2 min. (Haake CV20);
- La velocidad de rotación (rpm) se incrementó en niveles de 0 a 200 rpm y de nuevo a 0. Después de cada paso, la velocidad de rotación se mantuvo constante durante 2 minutos (Brookfield DVII, con Spindel núm.5).

Los resultados muestran cómo se pueden caracterizar los comportamientos reológicos de las distintas cales con resultados equivalentes a partir de la utilización de reómetros y viscosímetro. Propone una concentración de las cales del 30 %, si bien de dos de los once casos ha sido necesario estudiar concentraciones distintas, lo que dificulta la comparación de los resultados. La velocidad propuesta como óptima para la determinación de la viscosidad aparente es de 25 r.p.m. Lógicamente la historia de corte resulta determinante en los resultados de la tensión umbral (τ_0).

En cuanto a los resultados que presentan las cales, se observa como a las cales que muestran bajas viscosidades corresponden comportamientos tixotrópicos, mientras que aquellas cales de mayores viscosidades presentan comportamientos reopéxicos.

En general, las mayores viscosidades se explican por una mayor cantidad de láminas como nano-cristales y por la presencia de agregados atrapados en el medio de dispersión. En cambio, las bajas viscosidades de las cales se manifiestan con menos agregados y una superior polidispersidad que conduce a un mayor “empaquetamiento” y por lo tanto menor viscosidad.

4 Campaña experimental

4.1 Objetivos de la experimentación

La campaña de experimentación se realizó en distintas cales existentes en el mercado cercano, añejas y contemporáneas, sobre las que se procedió a medir las viscosidades y la caracterización de las partículas a nivel de distribución de tamaños y, en algunos casos, con la caracterización por microscopia electrónica (SEM).

La campaña también permitió estudiar el efecto del tiempo en la posible variación de las viscosidades de las pastas provenientes de sistemas de apagado en polvo, así como las diferencias y similitudes observadas en cales apagadas por distintos procedimientos.

Al mismo tiempo se experimentó en el propio procedimiento de medida de la viscosidad, de la preparación de muestras para la microscopia electrónica, la medición de la distribución de tamaños de partículas y la medición del grado de envejecimiento a partir del parámetro $A_{[0001]}$.

4.2 Materiales utilizados

Las cales utilizadas en este estudio se describen y codifican seguidamente.

CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO	EDAD meses
Sevilla	Cal cálcica añeja de Emilio Quílez	Cal en pasta	288
Moron	Cal cálcica añeja de Gordillo's	Cal en pasta	48
Moron 2	Cal dolomítica	Cal viva	-
AKRA (AK)	Cal cálcica añeja, supuestamente de Cales Pascual	Cal en pasta	36
OG 1mes	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	1
OG 18	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	18
OG 24	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	24
OG 60	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	60
OG1	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	
OG2	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	
Antiga 1 a 4	Cal cálcica añeja de Oriol García	Cal en pasta	>288
Unicmall	Cal cálcica añeja de Unicmall	Cal en pasta	Varios
Zone (Z1) (Z4) (Z2) (Z3)	Cal dolomítica procedente de Zone (BS) Italia	Cal viva Cal en polvo Cal en pasta	- - 1 a 3
Pachs (P)	Cal cálcica de Cales de Pach's CL 80 S y CL 90 S	Cal en polvo	-
ARIES (A)	Cal cálcica CL 80 S de Ciaries	Cal en polvo	-
CP	Cal cálcica CL 80 S de Caplansa	Cal en polvo	-
TV	Cal cálcica CL 80 S de Tudela Veguín	Cal en polvo	-
Pachs Labo	Cal cálcica en pasta confeccionada en laboratorio a partir de CL 90 S de Pach's	Pasta de cal	7
CC CALCASA	Cal cálcica en pasta procedente de Calcasa	Pasta de cal	12

4.2.1 Cales en pasta



Figura 47 Balsas de apagado en Moralsa. Foto procedente de www.emilioquilez.com

Sevilla. Bajo el nombre Sevilla hemos codificado la cal en pasta apagada y envejecida en balsas por Emilio Quílez. Sus señas le situaban en Espartinas (Sevilla), si bien parece que la cal podría proceder de Mollina (Málaga) (www.emilioquilez.com). El material estudiado tenía una antigüedad nominal de 24 años. (Apagada en 1984-85 por la entonces denominada *Sociedad Cal Grasa Al Andalus*).

Morón. Con el nombre Morón identificamos una cal en pasta fabricada por la empresa Gordillo's (ver 2.5 *Fabricación e industria*). Se trata de una cal cálcica en forma de pasta de 4 años de antigüedad.

También se ha trabajado con un óxido de cal procedente de esta empresa de origen dolomítico al que hemos denominado **Morón 2**.

AKRA. Se trata de una cal en pasta facilitada por la empresa constructora Cyes, con objeto de ser comparada con la cal Sevilla para la realización de la obra de restauración de las fachadas de un edificio de la Cámara de Comercio (antiguo Hotel Palace), en Alicante.

Según comentó la empresa constructora, la cal procede de Cales Pascual, en Paterna, (Valencia) (www.calespascual.com) y al parecer tiene una antigüedad aproximada de tres años. Se desconoce el sistema de fabricación de cales Pascual.

OG 1mes, OG 18, OG 24, OG 60, OG1, OG2, Antiga (1 a 4). Se trata de varias cales en pasta facilitadas por Oriol García, estucador (ver 2.5 *Fabricación e industria*) Se fabricaron a partir de óxido industrial de una cal cálcica y se hidrataron en balsa a baja temperatura. El proceso de envejecimiento se ha realizado en barriles de plástico. Las muestras se han tomado del tercio superior del barril.

Las edades de las cales oscilan entre 1 y >288 meses.

Unicmall. Como ya se ha comentado (ver 2.5 *Fabricación e industria*) la cal que produce esta empresa mallorquina se basa en óxido de origen industrial y procesos propios de apagado y envejecimiento en balsas, para generar una cal cálcica en pasta. Las muestras estudiadas tenían diferentes antigüedades, envejecidas en balsa. Una segunda colección de muestras la conforma cal viva y diferentes cales en pasta procedentes de procesos de apagado algo distintos y se han utilizado para el apartado

5.1.2.4 Apagados realizados por Unicmall en Mallorca (España).

Zone. La cal identificada como Zone, (Z1, Z2, Z3, Z4) proviene del pueblo de Zone en Italia, y se calcinó y apagó con procedimientos absolutamente tradicionales. Contrariamente a la mayoría de las anteriores, se trata de una cal en pasta de alto contenido en magnesio.

•FRX de las distintas cales en pasta

Los resultados de los análisis por FRX de las distintas muestras estudiadas están resumidos en la

Tabla 9 y la

Tabla 10

	AKRA	MORON	MORON 2	UNICMALL	ZONE
% CaO	96.54	94.82	60.02	91.5	58.61
% SO ₃	2.59	-	-	-	-
% MgO	0.51	2.03	36.45	0.3	40.8
% Al ₂ O ₃	0.13	-	-	0.6	0.13
% SiO ₂	-	0.38	0.25	0.8	0.30
% Fe ₂ O ₃	-	-	-	0.2	0.10

Tabla 9 Resultados FRX varias cales.

	OG 1m	OG 18	OG 24	OG 60	Antiga 1	Antiga 2	Antiga 3	Antiga 4
% CaO	96.03	94.81	94.96	95.65	97.72	97.91	97.89	96.82
% SO ₃	0.60	1.25	1.32	0.94	0.40	0.58	0.46	0.70
% MgO	1.65	1.10	1.14	1.23	0.98	0.92	0.96	0.69
% Al ₂ O ₃	0.43	0.95	0.81	0.63	0.12	-	0.11	0.20
% SiO ₂	1.03	1.34	1.24	1.11	0.26	0.33	0.29	1.21
% Fe ₂ O ₃	0.16	0.38	0.24	0.28	-	0.11	-	0.11
% LOI	0.0	0.0	1.42	0.0	5.70	1.95	0.0	5.73

Tabla 10 Resultados FRX cales OG.

4.2.2 Cales en polvo

Se han utilizado distintas cales en polvo de origen comercial. Seguidamente se reproducen algunos datos facilitados por las propias fábricas a partir de sus páginas web y de las fichas de características de los productos.

CALES DE PACHS. Montaña San Jaime, s/n (afueras), 08796 Pacs del Penedès, (Barcelona) www.calespachs.com, ver apartado 2.5 *Fabricación e industria*.

CIARIES. Comercial Industrial ARIES S.A. c/ Alí-Bei, 25. 08010 Barcelona. www.ciaries.com

Se dedica a la producción y comercialización de derivados y compuestos del carbonato cálcico (CaCO_3). Entre los primeros, se encuentran áridos y procesados del carbonato cálcico, como son el óxido cálcico y el hidróxido cálcico. Entre los segundos, mezclas para fundiciones, morteros, etc. Cuenta con dos centros de producción en España, uno en Olesa de Bonesvalls (Barcelona) y el otro en La Puebla de Albortón (Zaragoza).

CAPLANSA. Cales de la Plana S.A., La Pedrera, s/n. 12592 Chilches (Castellón) www.calcinor.com

Se dedica a la explotación, fabricación, comercialización de áridos calizos, dolomías, cal viva, cal hidratada y hormigón. Para desarrollar su actividad cuenta con tres canteras propias (dos en Chilches y una en Alcalá de Xivert), un horno vertical para calcinación de calizas y dolomías. Posee el certificado de registro de empresa según la Norma UNE-EN ISO 9001:2000 y el marcado CE para las cales destinadas al sector de la construcción.

CALCASA. Cal de Castilla, S.A. Ctra. Valencia, km 31, 28500 Arganda del Rey (Madrid) www.calcinor.com

Se dedica a la extracción, fabricación y comercialización de áridos calizos, cal viva, cal hidratada y pasta de cal. Para desarrollar su actividad cuenta con una cantera propia, instalaciones de trituración y clasificación para una amplia gama de áridos calizos para la construcción, dos hornos MAERZ para la obtención de cal viva, una instalación de micronización de cal viva y una instalación de hidratación para la fabricación de hidróxido. Posee el certificado de registro de empresa según la norma UNE-EN ISO 9001:2000 y el marcado CE para las cales destinadas al sector de la construcción.

TUDELA VEGUIN. c/ Aguelles 25, 33003 Oviedo. www.cementostudelaveguin.com

Empresa fundada en 1898 en Asturias, fue pionera al fabricar un producto novedoso en España: el cemento artificial. En la actualidad, sigue siendo un referente en la producción de cementos y cales a nivel internacional, apostando por la innovación y el absoluto compromiso con la naturaleza. Asimismo, Cementos Tudela Veguín S.A. forma parte de Masaveu Industria, la división del Grupo Masaveu dedicada a la fabricación de cementos, cales, morteros y hormigones entre otros productos.

De las preceptivas fichas técnicas se extraen los datos de las Tabla 11 y Tabla 12.

Especificaciones (EN 459-1)			
	CL 90 S	PACHS	TV
CaO + MgO	≥ 90 %	91.5 ± 1.1 %	96-97 %
MgO	≤ 5 %		0.7 %
CO ₂	≤ 4 %	1.4 ± 0.13 %	1.4 %
Estab. Volum.	≤ 2 mm		0.3 mm
>90 μm	≤ 7 %	0.02±0.01 %	2.7 %
>200 μm	≤ 2 %	0±0.01 %	0.0 %

Tabla 11 Valores de las cales CL 90 S.

Especificaciones (EN 459-1)			
	CL 80 S	PACHS 80 P80	CIARIES 80 A80
CaO + MgO	≥ 80 %	91 ± 1.5 %	> 80%
MgO	≤ 5 %		1.5 ± 0.2 %
CO ₂	≤ 7 %	1 ± 0.6 %	4 ± 0.5 %
Estab. Volum.	≤ 2 mm		0.4 ± 0.2 mm
>40 μm		5,10 ± 1.00 %	
>90 μm	≤ 7 %	2,04 ± 1.00 %	1.5 ± 0.5 %
>200 μm	≤ 2 %	0,65 ± 1.00 %	0.5 ± 0.5 %

Tabla 12 Valores de las cales CL 80 S.

La cal en polvo más utilizada en el trabajo experimental, y por tanto, la que representa el vínculo que permite relacionar distintos resultados es la CL 90 S de Pachs.

4.2.3 Pastas de cal “envejecidas”

Se han utilizado dos tipos de pastas de cal “envejecidas”:

La primera confeccionada en el laboratorio a partir de la mezcla y agitación suave de cal CL 90 S de Pachs y agua destilada. La pasta, generada con exceso de agua, se deja precipitar y envejecer en un recipiente de plástico con cerrado hermético.

El segundo tipo corresponde a diversas pastas de cal realizadas en fábrica por el grupo industrial Calcinor S.A. a partir de la mezcla con agua de su producto cal hidratada en polvo, proveniente de Cales de Castilla S.A. (Calcasa). Se dispone de pequeñas muestras de distintas antigüedades y de bidones comerciales de una misma partida. La que se ha denominado “CC” (Anexo 2) tenía en el momento de su estudio una antigüedad de 12 meses conservada en bidón de plástico.

4.3 Equipos y métodos experimentales

4.3.1 Caracterización de las partículas

Las técnicas fundamentales utilizadas para la caracterización de las partículas fueron:

- FRX para conocer la composición elemental en forma de óxidos.
- TGA para determinar cuantitativamente el contenido de agua libre en cales en pasta y pastas de cal.
- DRX para conocer los compuestos cristalinos superiores al 5 %, así como para discutir otros aspectos relacionados con la forma y tamaño de los cristales de portlandita.
- Granulometría láser que permite conocer la distribución granulométrica.
- SEM que nos ha permitido básicamente observar los cristales de cal.
- BET que proporciona un dato de superficie específica.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Técnica espectroscópica que determina la composición química de materiales inorgánicos a partir de su espectro de fluorescencia de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. Cuando ésta lo absorbe, produce una fluorescencia que es detectada, convertida en señal eléctrica y analizada por el equipo.

Cada elemento químico produce una fluorescencia de rayos X con una energía característica que se manifiesta en un espectro de fluorescencia de rayos X. Un espectro típico de FRX presenta una variedad de picos de intensidades diferentes. En el eje horizontal se muestra el valor de la energía de los rayos X emitidos (característicos de cada elemento químico) y en el eje vertical, la intensidad de cada línea de fluorescencia. Esta intensidad depende de la abundancia del elemento en la muestra analizada, por tanto es una técnica cuantitativa.

El equipo utilizado es el espectrofotómetro secuencial de rayos X Panalytical PW400, de los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona (SCTUB). Está equipado con el programa informático UniQuarnt® v 5.0 para realizar análisis semicuantitativos en todo tipo de muestras. Este software detecta 78 elementos de peso atómico superior o igual al flúor y corrige las interferencias espectrales más habituales y los efectos matriz por parámetros fundamentales. Están excluidos otros elementos, entre ellos varios lantánidos y actínidos. El análisis se realiza sobre la muestra previamente fundida (1500°C).

Análisis termogravimétrico (TGA)

Ensayo que mide, entre otros, la variación del peso de una muestra sometida a un proceso de calentamiento. Dicha variación se debe al desprendimiento de compuestos gaseosos como consecuencia de la temperatura. Los resultados registrados se suelen representar en una gráfica masa-temperatura, conocida como termograma, que proporciona información cualitativa y cuantitativa de las muestras.

Cada sustancia tiene un termograma característico donde se muestra un número determinado de peldaños con diferentes longitudes y pendientes que representan la pérdida de masa en función de la temperatura. El termograma (Figura 48) es por tanto un perfil que permite la identificación de sustancias por comparación con otros termogramas de referencia de materias puras.

La muestra se coloca en el interior de un horno, sobre un portamuestras conectado a una balanza que mide y registra gráficamente la variación del peso y de la temperatura.

Se ha utilizado un dispositivo TGDТА92 Setaram en un flujo de aire, (SCTUB). El equipo se programa con una velocidad de calentamiento de 10°C/min, desde 25/30°C hasta 1000°C.

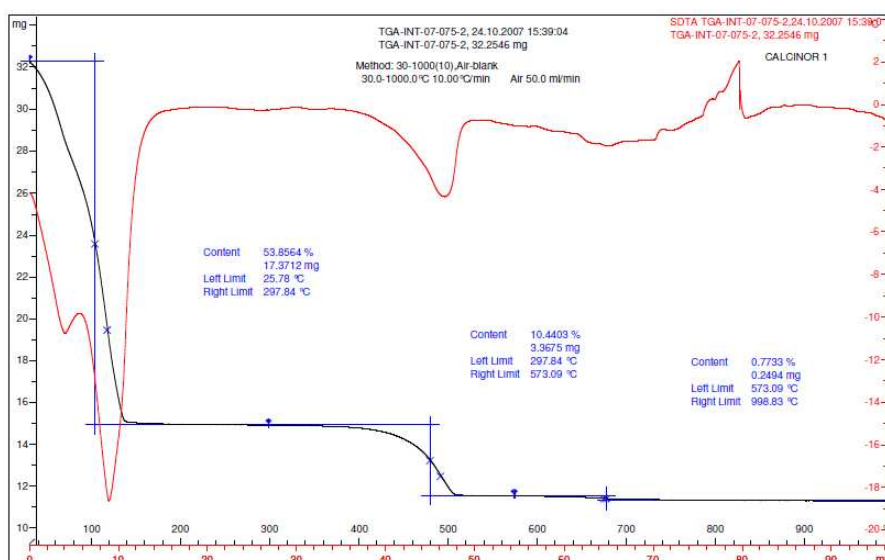


Figura 48 Termograma, representación gráfica de la pérdida de masa para una variación de temperatura.

Difracción de Rayos X (DRX)

Es una técnica de caracterización estructural de sólidos cristalinos. Las longitudes de onda de los rayos X utilizados son del mismo orden que las distancias interatómicas de los cristales, los cuales actúan como redes de difracción con intensidades y direcciones determinadas. La señal de difracción de un compuesto cristalino refleja directamente su estructura cristalina y permite identificarlo.

La aplicación fundamental de la DRX es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina a partir de la comparación del difractograma obtenido (Figura 49), con los resultados de los patrones de taraje, que suelen estar incorporados en los paquetes informáticos de soporte.

Para los análisis de esta tesis se han utilizado: un difractómetro PANalytical X'Pert PRO MPD, modelo DY 3197, con muestra en polvo (SCTUB) y un difractómetro Seifert modelo JSO-DEBYEFLEX 2002 de los Servicios Técnico de Investigación de la Universitat d'Alacant (STIUA).

En general, las muestras de cal en pasta y pasta de cal fueron desecadas en estufa en atmósfera de nitrógeno para prevenir la carbonatación.

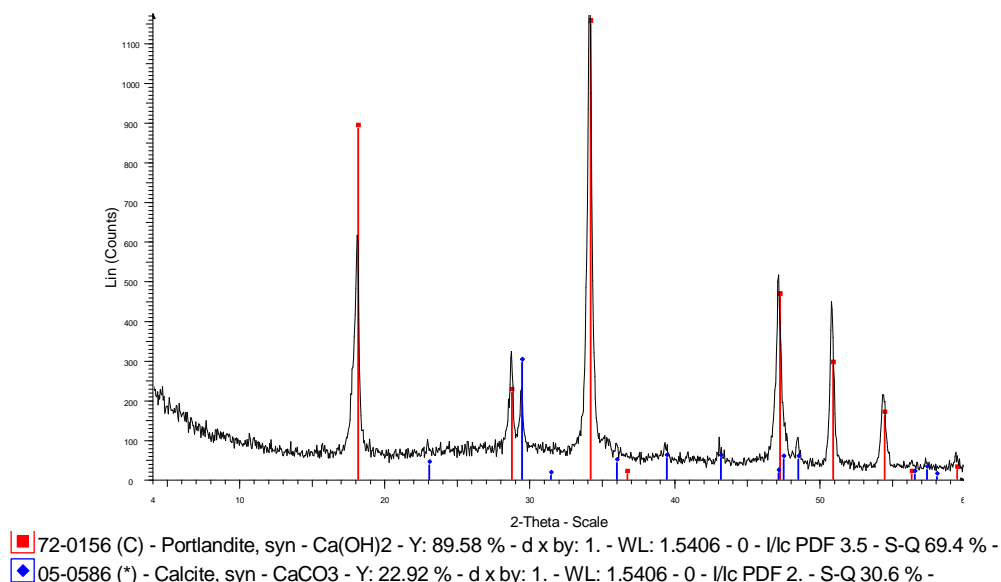


Figura 49 Difractograma de una muestra de cal, con la superposición de los patrones correspondientes a la portlandita (rojo) y a la calcita (azul).

Granulometría por difracción láser

Es una técnica capaz de medir partículas desde 20 nm a unos pocos milímetros en cuestión de segundos. Un flujo de partículas, por vía húmeda o por vía seca, es atravesado por un haz láser monocromático expandido, produciéndose una dispersión de luz cuya intensidad y ángulo son dependientes de su tamaño. A partir de los datos obtenidos de difracción se obtiene la distribución granulométrica de una muestra, mediante una serie de tratamientos y aproximaciones matemáticas, siguiendo las especificaciones de la norma ISO13320-1 de 1999.

Para determinar la distribución del tamaño de partículas se ha utilizado un analizador láser Beckman Coulter LS 13 320 (SCTUB) y un Mastersizer 2000 (Cales de Pachs). El medio dispersante utilizado ha sido el agua y se utilizaron ultrasonidos para homogeneizar la muestra y deshacer los agregados. Se realizaron pruebas preliminares con isopropanol.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Técnica microscópica en la que la muestra es impactada por un haz de electrones acelerado como fuente de iluminación. Se caracteriza por su alta resolución, que es mucho mayor que el resto de microscopías, dado que la longitud de onda de los electrones es muy inferior a la de la luz visible (se pueden llegar a discernir puntos separados 40 Å), y su profundidad de campo, que permite obtener imágenes tridimensionales porque puede enfocar a diferentes alturas.

Además se pueden analizar los electrones secundarios (SE), los retrodispersados (BSE) y las reflexiones de rayos X (EDS):

- Detectores de electrones secundarios (SE): permiten obtener imágenes topográficas, y proporcionan información sobre la morfología superficial y el relieve de las muestras.
- Detectores de electrones retrodispersados (BSE): proporcionan imágenes de contraste composicional. Dan información sobre el número atómico (información composicional) de los elementos de la muestra. Las imágenes son en tonos grises y el tono se va aclarando a medida que el peso atómico del elemento aumenta y su resolución es inferior que la de los detectores secundarios.
- Espectrómetro de rayos X (EDS): analiza la radiación X emitida por la muestra, determinando su composición elemental. Proporciona un análisis semicuantitativo de la muestra. Proporciona un espectro de energía dispersada, que es un gráfico donde el eje de abscisas corresponde a la energía de los rayos X y el eje de ordenadas representa el número de fotones para cada energía. El microanálisis se puede hacer en un punto, una línea o una superficie.

Para el desarrollo de la presente tesis se han utilizado los microscopios ESEM Quanta 200 FEI (ambiental), SEM Jeol JSM-840 con EDCAX, ambos de los SCTUB, el microscopio SEM Jeol JSM-840 con EDAX de la Universitat d'Alacant así como el microscopio SEM Jeol JSM 6400 y el Jeol JSM-7001F, Field Emission SEM de la UPC.

Superficie específica por adsorción de N₂ (BET)

Ensayo basado en la adsorción física de gases y vapores para estudiar la textura porosa de materiales sólidos. Consiste en exponer la muestra de un material poroso a un gas y estudiar la cantidad de gas que adsorbe a diferentes presiones. Con los datos obtenidos del ensayo se dibuja una gráfica, la isoterma de adsorción, que es una función que describe la cantidad de gas o vapor que un sólido poroso adsorbe en función de la presión, a temperatura constante. La isoterma depende de la distribución del tamaño de poros del material y representa la variación de presión en función del incremento de peso de la muestra cuando adsorbe un gas.

Como adsorbato suele emplearse el N₂ porque es el que mejores resultados proporciona.

La información que se obtiene es la determinación del área superficial (o superficie específica), el volumen de poros con un diámetro entre 2 nm y 50 nm así como su distribución de tamaño.

El equipo utilizado es el Micromeritics Tristar 3000 de los SCTUB.

4.3.2 Medida de la viscosidad. Metodología

Como ya se ha comentado en 3.2.1 *Introducción*, no existe un procedimiento normalizado para la medida de las características reológicas de las pastas de cal. Sí parece más cercana la posibilidad de que se establezcan algunas pautas, o incluso una metodología suficientemente acotada, para la medida de la viscosidad dinámica

de dichas pastas y para unas condiciones previamente fijadas (tiempo de ensayo, velocidad de aplicación del par, rampas o escalones de variación de velocidad, definiciones de condiciones de historia de corte previa, etc.).

Un primer intento de establecer unas condiciones de ensayo se encuentra en la metodología que utiliza la empresa privada italiana (labancadelacalce), que se comenta en el apartado 4.3.2.3 *Protocolo de medida de viscosidad en suspensiones de cal adoptado por labancadellacalce*, que es fruto de los trabajos de investigación del grupo del Departamento de Ingeniería de los Materiales y del Ambiente, de la Università di Modena e Reggio Emilia (Italia), plasmados en un artículo aún no publicado (88).

En este artículo, se trabaja con diferentes herramientas y se miden características con diversos procedimientos. Se concluye, entre otros, que el viscosímetro Brookfield utilizado permite obtener una clasificación de las muestras ensayadas de acuerdo con los datos obtenidos utilizando reómetros rotativos, y por lo tanto, el viscosímetro tipo Brookfield es recomendable ya que este instrumento es más económico y más fácil de operar.

A pesar de ello es necesario concretar diferentes aspectos de los procedimientos de medida y comprender el efecto de las variables que intervienen.

Variables en el proceso de medida:

- Temperatura del ensayo
- Rango de velocidades
- Tiempos de toma de datos
- Variables procedimentales vinculadas a la sedimentación (tiempo 0 desde el amasado, interrupciones en la aplicación del par).

Variables en la preparación de las muestras:

- Concentración de la dispersión
- Desorden inicial, historia de corte.
- Influencia del reamasado

4.3.2.1 Equipo de ensayo. Viscosímetro

Para la realización de las medidas de viscosidad se dispuso de un viscosímetro rotacional de la marca Haake, concretamente el modelo Viscotester 7L plus (Figura 50).



Figura 50 Vista del Viscosímetro rotacional, tipo Brookfield, Viscotester 7L plus de la marca Haake.

Se trata de un equipo de tipo medio, adecuado para el tipo de estudio realizado. Sus principales especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 13.

Condiciones ambientales:	Temperatura de +10 a 40 °C HR hasta 80 % (sin condensación)
Gama temperaturas del producto	-15 a 180 °C
Velocidades de rotación:	0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 4; 5; 6; 10; 12; 20; 30; 50; 60; 100; 200 min ⁻¹ Con una tolerancia respecto del valor absoluto inferior a ± 0.5 %
Precisión	± 1 % del valor de la plena escala utilizada
Repetitividad	± 0.2 % del valor de la plena escala utilizada
Resolución	3 a 6·10 ⁶ mPa·s

Tabla 13 Principales especificaciones técnicas del viscosímetro Viscotester 7L

El equipo está dotado de una sonda termométrica que permite tomar como dato la temperatura de la sustancia medida.

La toma de datos se realiza automáticamente acoplando el equipo a un ordenador convencional. El software utilizado, específico para equipos Thermo Scientific, es el HAAKE RheoWin 3.

Los parámetros de precisión, repetitividad y resolución son adecuados a los objetivos del estudio.

4.3.2.1.2 Velocidad de rotación y sensor

Al ser la pasta de cal un fluido no Newtoniano, su comportamiento depende de la velocidad de aplicación del esfuerzo deformante, en nuestro caso, un esfuerzo cortante, por tanto no se da linealidad entre viscosidad y velocidad de aplicación del esfuerzo de corte (Figura 36 y

Figura 38). Así resulta relevante discutir cual debe ser la velocidad aplicada en cada estudio.

Finalmente parece lo más apropiado ajustar esta velocidad de estudio al propio fin del estudio. Si se desea conocer el comportamiento del fluido para una aplicación determinada (aplicar con un leve masaje una crema cosmética o lubricar un motor que gira a 15.000 rpm), se deberá estudiar para esa velocidad concreta. Si se desea caracterizar el material en general para un cierto rango de velocidades, se deberán recorrer las diferentes velocidades de ese rango.

Seguidamente se muestra en la Tabla 14, a modo de ejemplo, diferentes gradientes de velocidad para diferentes aplicaciones. Como puede observarse, las velocidades pueden variar en un muy amplio espectro, de más de 10 órdenes de magnitud.

Proceso	Típico rango de velocidades (s^{-1})	Algunas aplicaciones
Sedimentación de partículas finas sobre un líquido	$10^{-6} / 10^{-4}$	Pinturas, medicina
Nivelación debida a tensión superficial	$10^{-2} / 10^{-1}$	Pinturas, tintas de impresión
Escurreo por gravedad	$10^{-1} / 10^1$	Pintar, blanquear
Extrusión	$10^0 / 10^2$	Polímeros
Amasado	$10^1 / 10^2$	Alimentos
Mezclado / agitado	$10^1 / 10^3$	Líquidos
Flujo en tuberías	$10^0 / 10^3$	Bombeado
Fricción	$10^3 / 10^4$	Cosmética
Lubricación	$10^3 / 10^7$	Motores

Tabla 14 Gradientes de velocidad para distintos procesos.

Para la caracterización de las cales es necesario realizar medidas a diferentes velocidades hasta la estabilización de la lectura para cada una de ellas. Se tratará de

un conjunto discreto de resultados (τ , t) o (μ , t), en función de la velocidad de giro del husillo. Como puede verse, y como ocurre siempre en un viscosímetro, no es posible establecer una rampa continua de incremento de velocidad de rotación por lo que debe actuarse por escalones.

Para determinados resultados de caracterización perseguidos se realizarán las lecturas a diferentes velocidades (típicamente de 3 a 200 rpm), mientras para estudios comparativos de comportamiento se fijará una velocidad de giro representativa de la velocidad de aplicación en construcción (típicamente 10 rpm).

En los primeros estudios se planteó la posible idoneidad de un husillo en forma de cruz u otro de superficies dentadas para mejorar la adherencia, pero se comprobó que con los elementos más comunes se podía realizar el estudio.

Distintas experiencias en este sentido se pueden encontrar en la escasa bibliografía referida específicamente a la cal.

Atzeni et al. en 2004 (89), para dos cales en pasta comerciales y una pasta de cal confeccionada en laboratorio, en concentraciones alrededor del 50 %, usa un viscosímetro dotado de cilindros coaxiales de 23,1 y 20,2 mm de diámetro y 19,6 mm de altura. Recorre diferentes velocidades entre 9 y 243 rpm.

Atzeni et al., en 2006 (90), para dos cales cocidas y apagadas en laboratorio utiliza un viscosímetro con un husillo de superficie dentada de 23,1 y 20,2 mm de diámetro y 19,6 mm de altura. Trabaja a 42 y a 14 s⁻¹ con unas pastas de concentraciones alrededor del 50 %

Lassinantti et al. (88) para diversas cales en pasta de diferentes orígenes y antigüedades, en concentraciones del 30%, utiliza el husillo estándar número 5, y recorre velocidades de 10 a 200 rpm.

El equipo de husillos de los que se dispone de forma convencional incluye 4 unidades de dimensiones diferentes. Se trata de la serie estándar y la mayoría de paquetes informáticos reconocen sus constantes. Estos diferentes husillos permiten diferentes rangos de lectura de viscosidad en función de la velocidad de ensayo.

El elemento tractor del aparato permite aplicar un esfuerzo de rotación máximo. Este se convierte en esfuerzo de corte máximo entre las superficies del husillo y el fluido analizado, que depende de la superficie de rozamiento y la distancia de esta al eje. En función de la geometría de los distintos husillos resulta limitado el esfuerzo cortante máximo a plicar según los siguientes valores:

- $\tau_{\text{MAX L1}} = 6 \text{ Pa}$
- $\tau_{\text{MAX L2}} = 30 \text{ Pa}$
- $\tau_{\text{MAX L3}} = 120 \text{ Pa}$
- $\tau_{\text{MAX L4}} = 600 \text{ Pa}$

Estos valores se convierten en limitaciones máximas de viscosidad a medir en función de la viscosidad de rotación según la expresión [9].

En la Figura 51 se reproducen los rangos máximos de lectura para cada husillo y velocidad. Si consideramos que los valores de viscosidad medidos para los distintos ensayos realizados varían entre 12 y 0.5 Pa·s, podemos observar la validez de los distintos husillos para las diferentes velocidades de ensayo, en la zona destacada en azul.

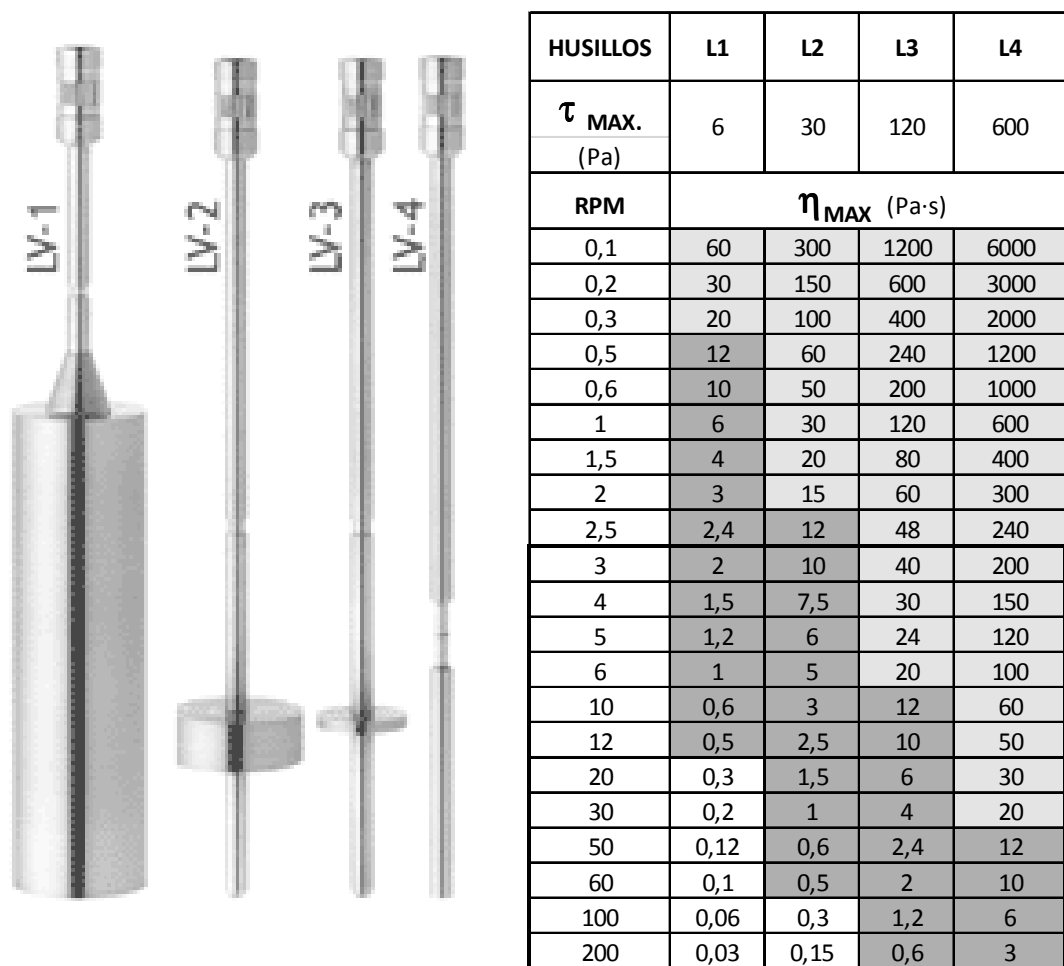


Figura 51 Husillos L1 a L4 y tabla de valores de viscosidad máxima, medible para cada velocidad.

Como puede verse, la limitación por husillo está en 6, 30, 120 y 600 Pa de esfuerzo cortante máximo para L1 a L4 respectivamente.

Con el objetivo de estudiar los resultados a diferentes velocidades y utilizando distintos husillos se realizaron series de lecturas variando velocidad, husillo, tiempos de lectura, etc.

Estas series de medidas permitieron, para los estudios de viscosidad de cales en pasta y pastas de cal:

- Fijar los husillos L2 y L3 como los más adecuados.
- Fijar el inicio de las series a distintas velocidades en 3 r.p.m.

Por otro lado era necesario estipular una velocidad única para la comparación entre las diferentes pastas. A la vista de los resultados de estas series y considerando la gran variación de velocidades en las distintas labores realizadas en construcción con las pastas y los morteros de cal (amasado a mano, a máquina, rejuntado de mamposterías, revoques, enlucidos, inyecciones, etc.):

Se estipuló una única velocidad con el valor de 10 rpm

De entre la escasa literatura al respecto, se ha comprobado que otros estudios, han destacado como valores de velocidad óptima para poner de manifiesto en mayor medida la diferencia entre distintas cales estudiadas, los 25 rpm (88).

4.3.2.1.3 Temperatura de ensayo

La temperatura del fluido también influye en su viscosidad. En general a mayor temperatura, menor viscosidad, pero la temperatura tiene, al menos, un doble efecto sobre las propiedades de flujo de las suspensiones.

En primer lugar, disminuye la viscosidad de la fase continua, obedeciendo a la ley de Arrhenius para fluidos clásicos.

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T}}$$

μ = viscosidad dinámica (Pa.s)

T = temperatura (K)

A y B = constantes propias del fluido

Por otro lado, el movimiento browniano de las partículas de la fase dispersa aumenta con la temperatura, como un efecto intrínseco y porque están en movimiento en una fase continua que cada vez es menos viscosa con el aumento de la temperatura. Esto eleva la tasa de interacción entre ellas, la fricción o colisión, y produce una mayor tasa de formación de la estructura. Esta fricción añade viscosidad al flujo, y la formación de microestructuras tiende también a aumentar el valor de la tensión umbral (τ_0). Este efecto de la temperatura es más marcado si la fracción de volumen es mayor (mayores cantidades de masa movilizadas en el ensayo).

Si el efecto final de la temperatura es aumentar o disminuir la viscosidad, depende del rango de la temperatura referido, de la fracción de volumen, y de si la temperatura puede ocasionar reacciones químicas importantes en la fase dispersa. Además, la tendencia no es la misma a diferentes velocidades de corte.

En el caso que nos ocupa, las suspensiones de cal, no se ha detectado que afecte de manera substancial la variación de temperatura entre unos límites razonables de uso práctico. En cualquier caso se ha tomado la medida de la temperatura en todas las determinaciones realizadas, como uno de los datos almacenados automáticamente por el viscosímetro.

De todas formas, las medidas se han realizado en una sala climatizada del laboratorio, donde la temperatura varía entre 19 y 24 °C. Las muestras y los husillos se han estacionado con suficiente antelación en esta sala para conseguir su atemperación previa al ensayo.

No se ha realizado ninguna campaña de medidas forzando variaciones de temperatura de manera importante con el objetivo de medir su efecto.

Igualmente no se consideran presiones diferentes de las ambientales.

4.3.2.1.4 Concentración de la dispersión

Si algún factor es claramente condicionante de la viscosidad de un fluido, este es la concentración de la dispersión, entendida como la razón entre la fase sólida (disperso) y el conjunto disperso - dispersante.

Las diferentes razones de esta condición se han descrito en 3.2.3. *Factores que rigen la reología de las pastas*. Básicamente y de forma resumida podemos considerar que la mayor proximidad de las diferentes partículas afecta a la posibilidad de caer en la “trampa de energía” provocando la aglomeración de las mismas. Así pues, resulta imprescindible considerar el dato de la concentración de la dispersión para el análisis de la viscosidad.

Cuando se desea conocer el comportamiento de un determinado producto (en nuestro caso, cal en pasta) es necesario estudiarlo con la proporción original de sus componentes. En este caso y a efectos de análisis comparativo es importante considerar las distintas concentraciones como dato.

En estudios en los que se pretende comparar el comportamiento reológico de la parte sólida de diferentes materiales, parece adecuado definir un único valor de concentración.

Durante el proceso de experimentación se fijaron dos criterios.

Por un lado se decidió tomar como valor de concentración común, para la comparación de diferentes cales, el valor de la concentración que presenta el producto de menor concentración. Este valor resultó ser el 38 % de sólido respecto del total de la dispersión (38 % sólido + 62 % agua). Inicialmente se exploraron diferentes valores alrededor de este máximo posible válido para todas las muestras.

Por otro lado se fijó un valor de concentración claramente menor con el fin de facilitar la homogeneización de las nuevas pastas así generadas. Este valor fue el 30 %, que resultó ser coincidente con los estudios, entonces en curso, por el grupo de labancadellacalce (88).

En la (Figura 52) a modo de ejemplo, se muestran los resultados de los análisis de una cal con concentraciones del 36, 37 y 38 %. La cal es la nombrada Sevilla con una concentración original del 38 %. Las otras dos concentraciones 37 y 36 % se consiguen añadiendo agua y reamasando. Se observa claramente como tan pequeñas variaciones de concentración, con el correspondiente reamasado, varían los valores de las viscosidades, si bien podemos ajustar un mismo modelo de comportamiento, en nuestro caso la ley de potencia, con valores de R^2 razonablemente elevados.

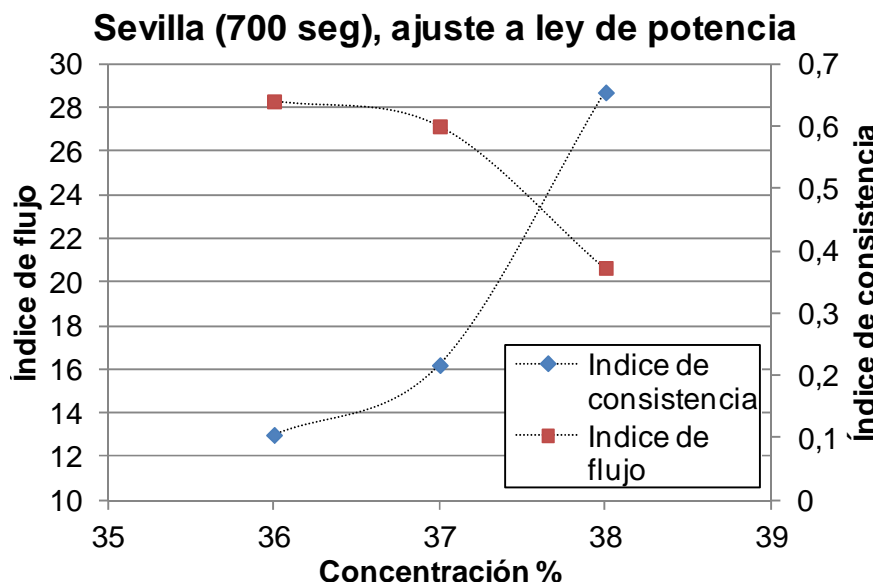
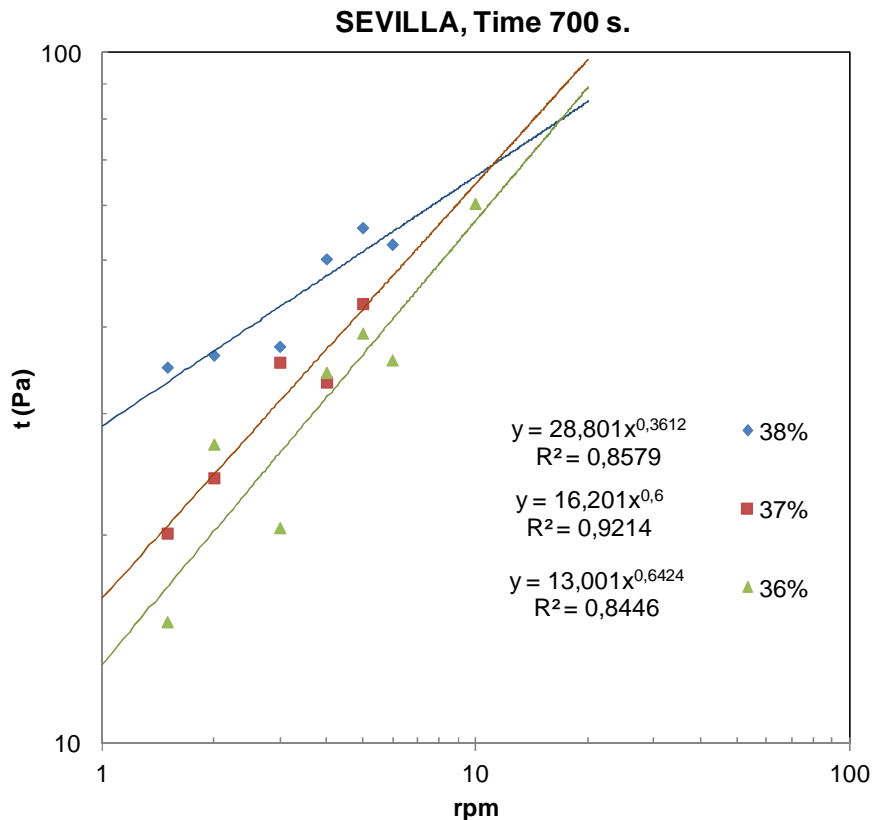


Figura 52. Medidas de tensiones de corte a bajas velocidades de tres concentraciones de una misma cal (Sevilla) y modelo de comportamiento de ley de potencia, ajustado a las determinaciones realizadas a 700 segundos.

4.3.2.1.5 Tiempo de lectura

La viscosidad que presenta una dispersión de cal como las que estamos estudiando, varía con el paso del tiempo a lo largo de la lectura. Las primeras lecturas muestran valores de tensión de corte superiores y con el paso del tiempo éstas tienden a una cierta estabilización. Atzeni C. (91) (90), refiriéndose a pastas de cal cita la ecuación

de Tattersall (92) referida a pastas de cementos portland, que plantea un modelo de comportamiento de la variación de la tensión de corte con el paso del tiempo, a velocidad de giro constante:

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_M - \sigma_e) \cdot e^{-t/T}$$

Donde:

σ_e corresponde al valor de equilibrio de la tensión de corte cuando el tiempo (t) tiende a infinito.
 σ_M corresponde al valor inicial de tensión de corte (habitualmente nombrado como tensión umbral τ_0)

T es una constante que define la curvatura de la función.

Al tratarse de velocidad de giro constante la expresión es equivalente a:

$$\mu = \mu_e + (\mu_M - \mu_e) \cdot e^{-t/T}$$

que se expresa como relación de viscosidades.

La ventaja de este modelo es la inmediata interpretación física de la expresión matemática a partir de los diferentes parámetros.

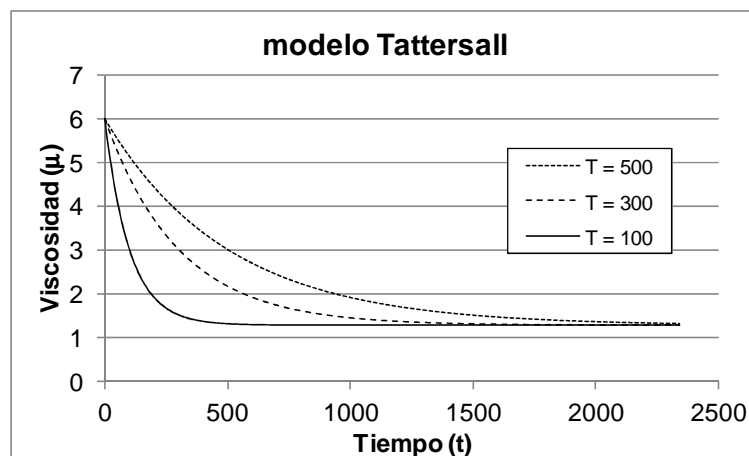


Figura 53. . Ejemplo de representación de la evolución de la viscosidad a lo largo del tiempo de ensayo para tres ecuaciones que siguen el modelo de ajuste exponencial con valores de $\mu_e = 1,3$, $\mu_M = 6$ y $T = 500/300/100$ respectivamente.

Nuestra experiencia en distintas medidas de tensiones de corte en pastas de cal y cales en pasta (como se verá más adelante) nos indica que en general se ajusta mejor a los resultados experimentales, para un cierto tiempo de ensayo, un modelo potencial como el siguiente:

$$\mu = k \cdot t^b$$

Este modelo no presenta una fácil interpretación del significado físico de los parámetros “k” y “b”.

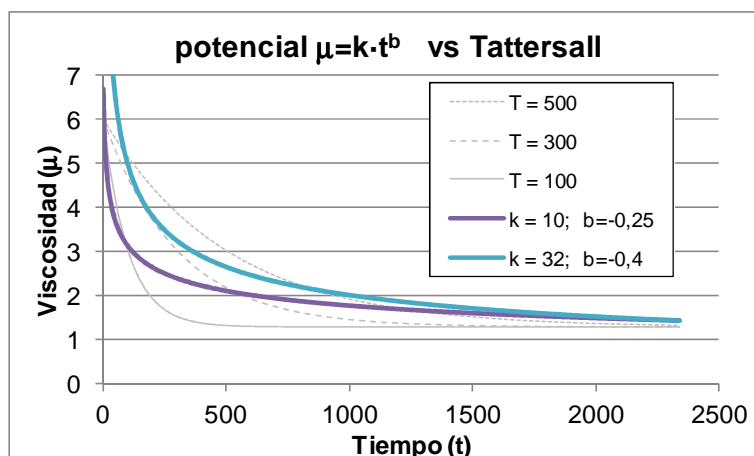


Figura 54. Representación de la evolución de la viscosidad a lo largo del tiempo de ensayo para dos ecuaciones que siguen el modelo de ajuste potencial con valores de $k = 10 / 32$ y $b = -0.25 / -0.4$ respectivamente, comparados con los modelos exponenciales de la figura anterior.

Es conocido que si se prolonga en gran manera el tiempo de lectura se producen fenómenos que provocan el aumento de los valores de tensión de corte necesaria hasta un máximo, para después volver a decaer hasta una cierta constante. Los fenómenos de sedimentación también tenderán a aumentar la tensión de corte necesaria con el paso del tiempo.

Atzeni y otros (82), realizan dos tipos de lecturas-tiempo. Por un lado y para distintas velocidades (9 a 243 r.p.m.) realizan lecturas hasta 720 segundos. Por otro, estudian el comportamiento a tiempos muy elevados y para distintas temperaturas (20 °C, hasta 5000 segundos y 30°C hasta 11000 segundos), (Figura 55).

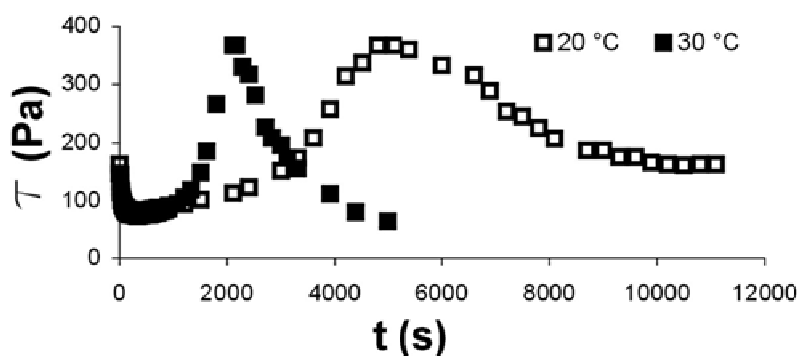


Figura 55 Tensión de corte vs tiempo de ensayo para una misma muestra de cal en pasta a 20 y a 30 °C, a velocidad de giro constante de 192,5 s⁻¹, procedente de Atzeni y otros (82).

En nuestro caso, hemos buscado un tiempo suficiente para garantizar la estabilidad del valor de tensión de corte para cada velocidad de medida en algunos casos mientras que en otros se ha fijado el valor del tiempo de medida para comparar el resultado entre distintos materiales.

Las primeras pruebas se realizan a tiempos muy cortos (90 segundos). Véase, por ejemplo la Figura 60. Se observa que el tiempo de ensayo resulta en algunos casos

insuficiente para garantizar la estabilidad de los valores de tensión de corte. Son necesarios tiempos mayores en función de la velocidad de aplicación del esfuerzo y en función del tipo de cal estudiada.

Las siguientes medidas se realizaron a 720 segundos de forma ininterrumpida. Se observó que, en general, siempre se consiguen lecturas constantes en los últimos cientos segundos (100, 200 o incluso 300 segundos).

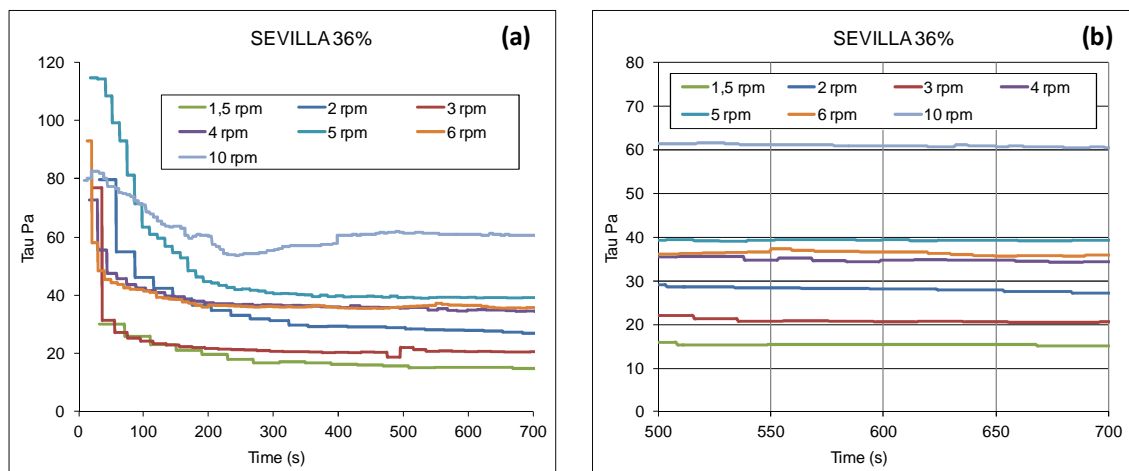


Figura 56. Gráficos correspondientes a la determinación de las tensiones de corte aplicadas para mantener bajas velocidades (1.5 a 10 rpm) de una cal en pasta. (a) Muestra el gráfico completo de la medida de 0 a 700 segundos. (b) Ampliación del gráfico (a) para el intervalo de 500 a 700 segundos.

Como se puede observar en la Figura 56 se consigue una lectura suficientemente estable alrededor de los 600 segundos. También se puede observar cómo, a mayor velocidad de giro, es necesario más tiempo para conseguir valores estables de lectura.

Para la campaña de ensayos correspondiente a las pastas de cal formuladas en laboratorio se observó, en un número significativo de los casos estudiados, fenómenos que se podrían atribuir a procesos de sedimentación de las dispersiones. Estos casos se daban en mayor medida en las pastas recién confeccionadas a partir de una cal cálcica en polvo.

Para discernir este comportamiento se decidió repetir tres veces las lecturas a 600 segundos, con un protocolo como se muestra en la Figura 65. Durante el proceso de ensayo se aplica una rotación de 10 rpm durante 600 segundos, se detiene el giro durante 120 segundos, una segunda vez se ensaya a 10 rpm durante 600 segundos, nuevamente reposo durante 120 segundos para finalizar con una nueva lectura a 10 rpm durante 600 segundos. Es de destacar que en esta metodología no se produce reamasado de la muestra en los tiempos de reposo del viscosímetro, por tanto, aquellos procesos de sedimentación que pudieran darse en este (corto) período de tiempo serán detectables por falta de continuidad aparente de los valores leídos.

Esta metodología puede mostrar resultados (t , η) como los que se observan en los gráficos de la Figura 57.

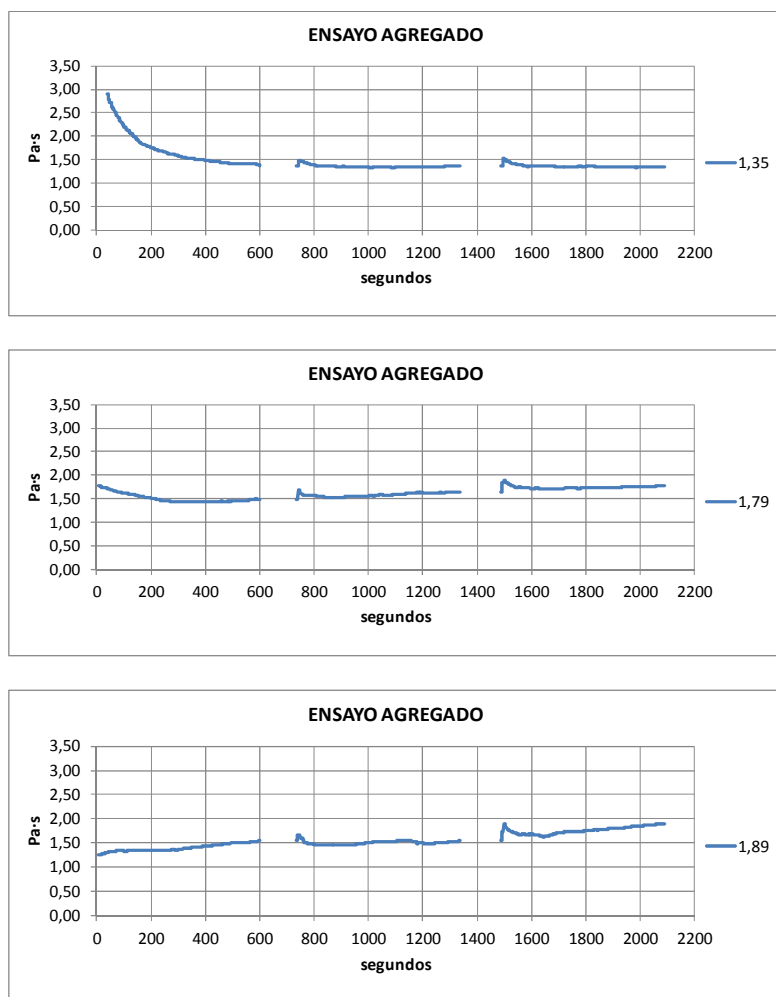


Figura 57. Curvas de flujo correspondientes a tres determinaciones de una misma pasta. Se puede observar como el resultado a un determinado tiempo no es suficiente para definir la medida.

Podemos entender como valor de la viscosidad resultado del ensayo, a la velocidad de aplicación del esfuerzo de corte, el definido por la tangente horizontal a la curva de evolución de la viscosidad en el tiempo. En este caso puede resultar de interés el estudio del tiempo necesario para conseguir la tangente horizontal.

El planteamiento de establecer como variable el tiempo de ensayo hasta conseguir el menor valor de lectura de esfuerzo aplicado complica el procedimiento dado que, en principio, no se puede programar la campaña de medidas con precisión. Por lo tanto, se ha optado por definir en cada protocolo de ensayo (4.3.2.4 *Metodología seguida para la medida de la viscosidad*) el tiempo (o el criterio) para definir el valor de la viscosidad dinámica.

4.3.2.1.6 Influencia del amasado

Uno de los aspectos que más influyen en el comportamiento reológico de las suspensiones es su “historia de corte”. Se trata del conjunto de procesos de aplicación de energía, en forma de movimiento, generado previamente al propio proceso del ensayo.

Para uniformizar la influencia de esta variable, asumiendo que implica una variación importante de la tensión de corte umbral (τ_0), se decidió tipificar este hecho provocando mecánicamente un amasado inicial previo a la medición de la viscosidad. Este proceder imposibilita determinar la tensión de corte umbral, pero entendemos que lo que realmente nos interesa en condiciones de obra es el comportamiento del fluido (pasta o mortero) al aplicarlo al soporte (extendido), entendiendo que el amasado lo realizaremos mecánicamente en una amasadora o mediante rotómetro.

En general, las distintas muestras se han colocado en un bote cilíndrico de dimensiones 65 mm de diámetro por 90 mm de altura, cerrado con doble tapa, y previamente a la realización de las medidas de viscosidad se ha homogeneizado el material mediante la aplicación de un amasado mecánico, a unas 100 rpm durante 5 minutos, aplicado con el equipo que se muestra en la Figura 58. El tiempo de interrupción entre el amasado y el inicio de las lecturas con el viscosímetro ha sido de 10 minutos.



Figura 58. Agitador rotacional utilizado para el amasado previo al ensayo de las pastas de cal.

Con este proceder se logra la incorporación a la pasta de la película de agua superficial, que en los casos de concentraciones menores (30%) puede ser de varios milímetros.

Al mismo tiempo se minimiza el efecto posterior de variación de historia de corte por introducción del husillo de aplicación del movimiento, en el viscosímetro.

También se produce un efecto de homogeneización de las muestras en cuanto al posible gradiente de tamaño de partículas, producido en el proceso pretérito de reposo.

4.3.2.2 Estudio de las medidas de viscosidad para rampa de variaciones discretas de velocidad o lecturas independientes

Para la caracterización del modelo de comportamiento de las dispersiones es necesario estudiar su respuesta a varios tiempos de aplicación de esfuerzos y a varias velocidades de aplicación. Recordemos que se trata de un fluido no-newtoniano.

Un viscosímetro no permite variar la velocidad de giro de forma continua. Para obtener respuestas a diferentes velocidades es necesario realizar lecturas independientes, que pueden realizarse de forma continuada, con períodos de interrupción menores o mayores, o realizarse de forma independiente partiendo cada determinación a cada velocidad de una misma situación inicial.

A priori se desconoce el posible efecto de estos diferentes procedimientos, por lo que se plantea un pequeño estudio para ver si se trata de factores muy determinantes o no en los resultados.

Materiales y métodos

Para obtener datos propios en este sentido se decide estudiar la diferencia en los resultados del comportamiento reológico de dos tipos de muestras de pastas de cal. Se trata de dos pastas de cal preparadas en laboratorio a partir de dos cales industriales apagadas en polvo: Pachs CL 80-S y Aries CL 80-S. En ambos casos se preparan sendas dispersiones con concentraciones al 38 %.

Previamente a la realización del ensayo se procede a amasar las muestras a 100 rpm durante 5 minutos para, posteriormente, reposar durante 2 minutos.

En las dos muestras paralelas se realizan las lecturas de tensión de corte, para cada velocidad de ensayo, hasta los 90 segundos de velocidad constante. Entre ambas muestras varía la metodología seguida para el paso de una velocidad a la siguiente.

En el caso “Medidas separadas” (MS) se ha procedido con tiempos de espera de 90 segundos entre etapas de giro. No se produce reamasado de la pasta entre etapas a velocidades distintas, ni siquiera se extrae el husillo (Figura 59 MS).

Para el caso “Rampa” (R) se ha seguido un procedimiento consistente en aplicar cada una de las velocidades de ensayo progresivamente, sin períodos de reposo entre velocidades distintas (Figura 59 R).

Este tipo de proceder, provocando la interrupción breve del esfuerzo, se da en multitud de estudios similares en pastas y morteros (88) (93) (94) (95).

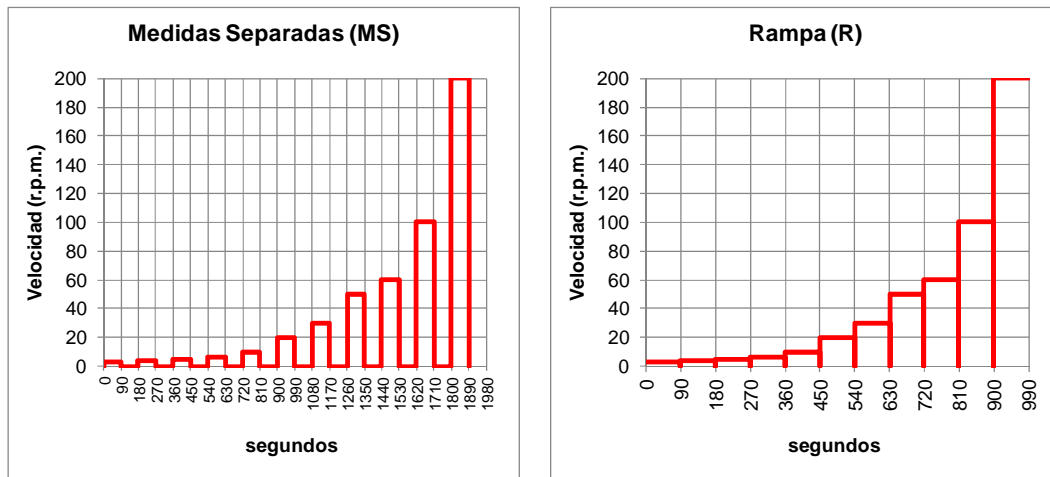


Figura 59. Gráficos que muestran el procedimiento velocidad-tiempo seguido para cada una de las dos metodologías estudiadas (MS), (R)

Resultados y análisis

Los resultados que se muestran seguidamente responden a medidas realizadas a 90 segundos de aplicación del esfuerzo de corte para mantener constante cada una de las velocidades de cada escalón. Como puede observarse en la Figura 60, las lecturas no responden a valores de estabilización del esfuerzo de corte en el tiempo, dado que 90 segundos no es intervalo suficiente para que se produzca.

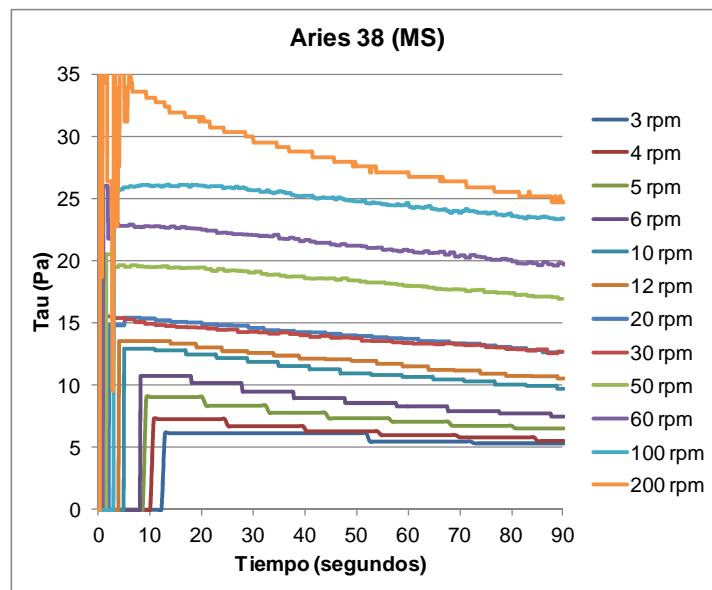


Figura 60. Resultados correspondientes a la medida de las tensiones de cortante aplicadas a la muestra Aries CL80 S, para cada velocidad de corte, de 0 a 90 segundos.

En la Figura 61 y la Figura 62 se muestran los resultados correspondientes respectivamente a la pasta de cal Pachs CL-80 S y la de Aries CL-80 S, en forma de tabla y en forma de gráficos con los correspondientes modelos ajustados a un fluido pseudoplástico.

PACHS	
Tº = 21ºC	Tipo = CLDP
Concentración = 38%	Pureza = CL80

Velocidad (rpm)	Medidas separadas		Rampa	
	Thau (Pa)	Viscosidad (Pa·s)	Thau (Pa)	Viscosidad (Pa·s)
3	16,41	5,47	13,50	4,50
4	17,88	4,47	12,69	3,17
5	17,01	3,40	13,47	2,69
6	18,57	3,10	15,00	2,50
10	14,28	1,43	21,06	2,11
12	17,52	1,46	24,24	2,02
20	27,48	1,37	25,68	1,28
30	42,12	1,40	28,20	0,94
50	57,72	1,15	32,17	0,64
60	59,04	0,98	32,16	0,54
100	66,12	0,66	39,44	0,39
200	74,76	0,37	53,52	0,27

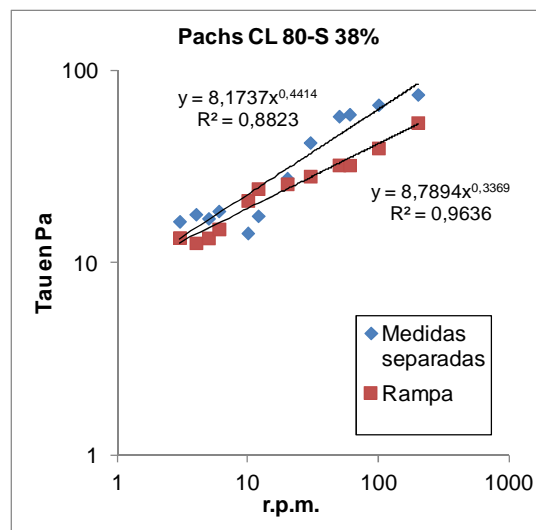


Figura 61. Resultados correspondientes a 90 segundos de la medida de las tensiones de corte aplicadas para mantener cada velocidad de giro (Tau (Pa)), a las viscosidades calculadas (Viscosidad (Pa·s)) y a la modelización del comportamiento de una pasta de cal realizada en laboratorio, a partir de una cal hidratada en polvo de origen industrial (Pachs CL 80 S), en una concentración del 38%.

ARIES	
Tº = 21ºC	Tipo = CLDP
Concentración = 38%	Pureza = CL80

Velocidad (rpm)	Medidas separadas		Rampa	
	Thau (Pa)	Viscosidad (Pa·s)	Thau (Pa)	Viscosidad (Pa·s)
3	5,31	1,77	6,06	2,02
4	5,55	1,39	7,11	1,78
5	6,54	1,31	8,58	1,72
6	7,50	1,25	9,57	1,60
10	9,75	0,98	11,49	1,15
12	10,56	0,88	12,34	1,03
20	12,66	0,63	12,60	0,63
30	12,69	0,42	10,20	0,34
50	17,07	0,34	13,56	0,27
60	19,80	0,33	13,92	0,23
100	23,34	0,23	15,72	0,16
200	24,72	0,12	21,12	0,11

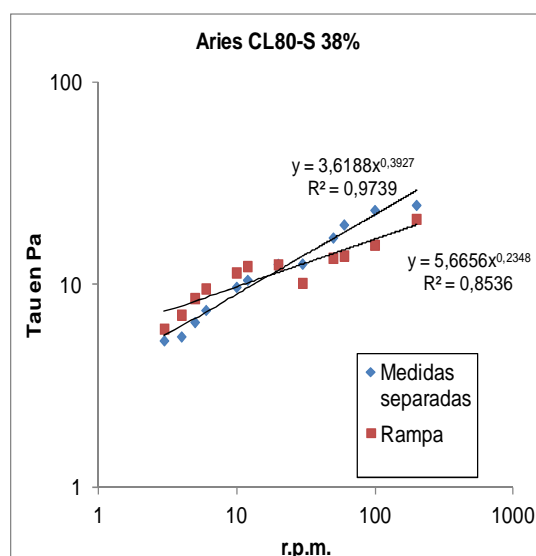


Figura 62. Resultados correspondientes a 90 segundos de la medida de las tensiones de corte aplicadas para mantener cada velocidad de giro (Thau (Pa)), a las viscosidades calculadas (Viscosidad (Pa·s)) y a la modelización del comportamiento de una pasta de cal realizada en laboratorio, a partir de una cal hidratada en polvo de origen industrial (Aries CL 80 S), en una concentración del 38%.

De los resultados podemos destacar:

- Los resultados son parecidos aunque no completamente coincidentes.
- Para las dos cales y para ambos procedimientos (MS y R) el orden creciente (η) o decreciente (τ) de los valores se mantiene con el incremento de velocidad de corte.
- Para ambas cales los valores de tensiones de corte (τ) obtenidos por MS son superiores a los obtenidos mediante R, a mayores velocidades de corte. Este efecto es atribuible a la capacidad de las dispersiones de ambas cales de regenerar parcialmente su estructura inicial a lo largo de los tiempos de espera en el procedimiento MS, máxime si consideramos los relativamente cortos tiempos de aplicación del esfuerzo cortante (sólo 90 seg.).
- Para el caso de la cal de Pachs, los modelos de comportamiento ajustados como fluido pseudoplástico para cada procedimiento presentan parámetros muy similares, siendo diferentes los correspondientes a la cal Aries.

Modelo Fluido Pseudoplástico. Ley de potencia	$\tau = K\dot{\gamma}^n$
Pachs MS	$\tau = 8,2 \dot{\gamma}^{0,44}$
Pachs R	$\tau = 8,8 \dot{\gamma}^{0,34}$
Aries MS	$\tau = 3,6 \dot{\gamma}^{0,35}$
Aries R	$\tau = 5,6 \dot{\gamma}^{0,25}$

- Si se representan los gráficos correspondientes a la curva de fluidez en escalas ordinarias (Figura 63) se observa una tendencia a un cierto cambio de inclinación en la curva de flujo, para ambas cales. Este cambio de pendiente se sitúa alrededor de las 10 o 12 rpm y se muestra más claramente en las medidas realizadas por mediación de R. Estos resultados resultan notablemente coincidentes con los que posteriormente presento Lassinantti y otros (88) en sus experiencias con cales en pasta y procedimientos de ensayo con reómetro y rampa continua de incremento de velocidad entre 0 y 100 r.p.m.

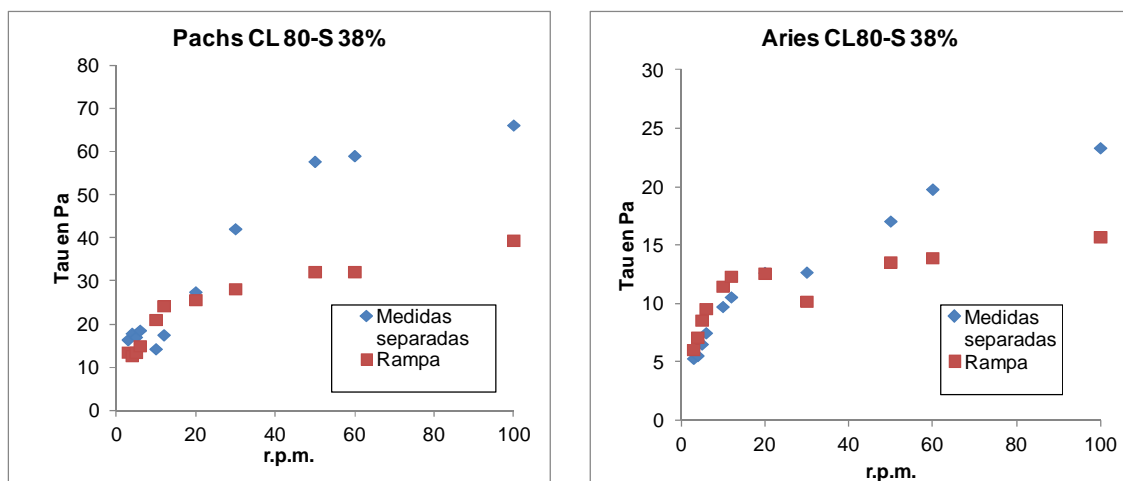


Figura 63. Curvas de fluidez de los resultados anteriores a escalas ordinarias.

Conclusiones

A modo de conclusión de esta experiencia podemos considerar que no existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos por ambos procedimientos, si bien no son coincidentes.

Parece pues recomendable explicar en cada caso el procedimiento seguido, respecto a los tiempos de interrupción entre determinaciones a distintas velocidades.

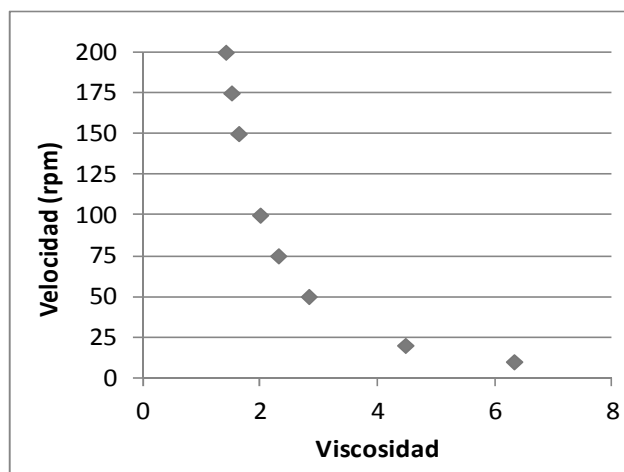
4.3.2.3 Protocolo de medida de viscosidad en suspensiones de cal adoptado por *labancadellacalce*

La inquietud por resolver la problemática de establecer una metodología para la determinación de la viscosidad en pastas de cal es compartida por distintos grupos de investigación. Uno de ellos, con el que mantenemos contactos y compartimos informaciones es el Forum Italiano Calce, que agrupa bajo la presidencia del profesor Andrea Rattazzi, un conjunto heterogéneo de casi 500 profesionales investigadores universitarios, arquitectos, restauradores, artesanos, productores, historiadores, etc. de varios países, principalmente de Italia.

Una parte de este grupo está preparando un protocolo con la intención de generar, finalmente, una norma local italiana, que ampare la cal en pasta. Se trata del “*Disciplinare Tecnico Grassello di Calce Invecchiato*” (96)

En resumen, el citado documento propone un procedimiento basado en los siguientes aspectos significativos:

- Fija inicialmente la concentración de la pasta al 30 %
- Propone la homogeneización a partir de un mezclado a 100 rpm durante 5 minutos previamente a la medida de la viscosidad. Por tanto se alteran las condiciones para determinar el valor de la tensión de corte umbral τ_0 .
- Se miden los valores de esfuerzo de corte τ_i para distintas velocidades de rotación, de forma discontinua y creciente de 10 a 200 rpm.
- Se toma como valor representativo de cada velocidad el valor de la viscosidad ($\eta = \tau / \dot{\gamma}$) una vez estabilizada la lectura a los 2 minutos.



- Se da como resultado un gráfico de valores de viscosidad en función de las velocidades de ensayo.

4.3.2.4 Metodología seguida para la medida de la viscosidad

Como se ha dicho, no existe una metodología de medición de la viscosidad a partir de la utilización de un viscosímetro, ni existen valores de referencia que permitan calificar las cales.

Para el propósito de esta tesis resulta imprescindible definir metodologías de medida, dado que se busca comparar los resultados de la medida de la viscosidad para distintas cales. Esta metodología no puede ser única ya que la propia viscosidad de la pasta limita determinados procedimientos o rangos (concentraciones, husillos, tiempo de estabilización, homogeneización, etc.).

Para los distintos casos de estudio se han escogido diferentes protocolos de ensayo en función de los resultados buscados.

El **protocolo A1** busca caracterizar el comportamiento reológico de las cales en su concentración original, por tanto se aplica a la caracterización de cales en elevadas concentraciones, a partir del ajuste de los parámetros de un modelo general en función de la velocidad de giro, para un tiempo “razonable” de estabilización. En este sentido se recorre un amplio espectro de velocidades dado el carácter no newtoniano del fluido.

El **protocolo A2** se aplica a pastas con concentraciones menores y se buscan tiempos de estabilización mayores, así como, se valora la posible sedimentación. El objetivo es comparar cales en condiciones simplificadas (a una única velocidad) así como valorar la “mejora” de viscosidad con el tiempo de almacenamiento de pastas de cal.

El **protocolo A3** se aplicó únicamente a una cal en pasta de corta edad (Zone 2 y Zone 3).

Protocolo A1.

(Seguido en la determinación de la viscosidad en cales en pasta añejas en sus concentraciones comerciales o ligeramente diluidas)

Homogeneización de la muestra.

Previamente a la realización del ensayo se procede a amasar la muestra a 100 rpm durante 5 minutos (Figura 58) para, posteriormente, reposar durante 2 minutos.

Velocidades y secuencia de aplicación del esfuerzo cortante.

Se realizan medidas a diferentes velocidades crecientes de forma discontinua (3, 4, 5, 6, 10, 12, 20, 30, 50, 60, 100, 200 rpm), con intervalos de reposo de 3 minutos, sin extracción del husillo (Figura 64).

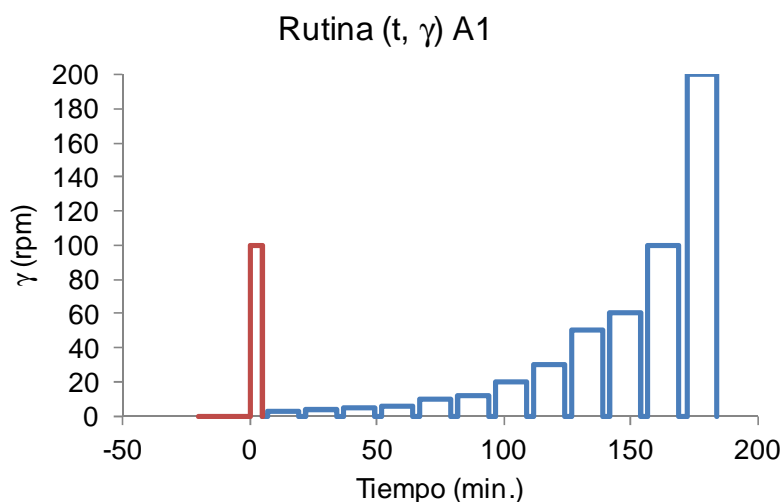


Figura 64 Esquema de aplicación del amasado previo (rojo) y secuencia creciente discontinua de velocidades de rotación-reposo (azul).

Husillo.

Se utilizarán preferentemente los husillos normalizados L3 y L4, para velocidades bajas y altas respectivamente. Los límites para el cambio de husillo dependen de la propia viscosidad del producto analizado, pero en cualquier caso se dejará constancia del útil empleado.

Tiempo de lectura para cada velocidad y valor de la viscosidad a tiempo T.

El tiempo para fijar el valor de la viscosidad a cada velocidad se fija en 700 segundos, presentándose como resultado la media de las 20 lecturas alrededor del $T=700$.

Protocolo A2.

(Seguido en la determinación de la viscosidad en cales en pasta añejas en concentraciones diluidas y en pastas de cal)

Homogeneización de la muestra.

Previamente a la realización del ensayo se procede a amasar la muestra a 100 rpm durante 5 minutos (Figura 58) para, posteriormente, reposar durante 2 minutos.

Velocidades y secuencia de aplicación del esfuerzo cortante.

Se realizan medidas a velocidad constante de 10 rpm. A lo largo de 600 segundos seguidos de períodos de reposo de 2 minutos, sin extracción del husillo (Figura 65).

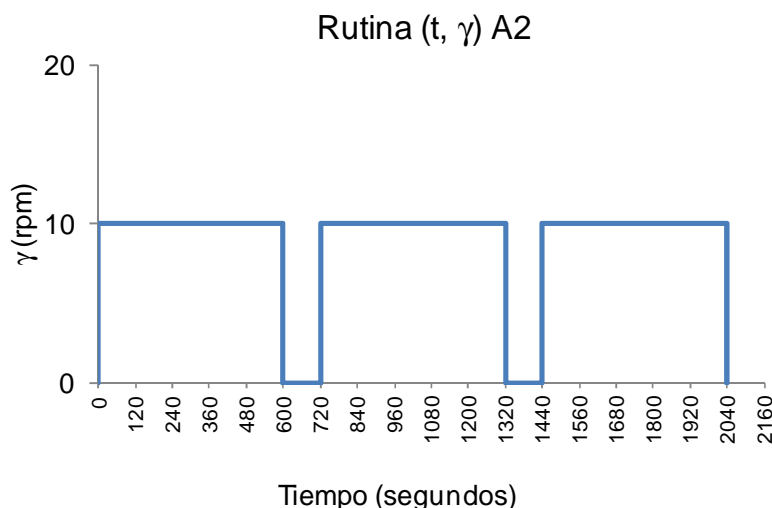


Figura 65 Gráfico explicativo del proceso de lectura correspondiente a la rutina del protocolo A2

Husillo.

Se utilizarán preferentemente el husillo normalizado L3. Si en algún caso la lecturas están fuera del rango de trabajo del husillo L3, se procederá con el siguiente (L2 o L4) pero, en cualquier caso, se dejará constancia del útil empleado.

Tiempo de lectura valor de la viscosidad.

El tiempo para determinar el valor de la viscosidad se fija en la zona final de cada período de 600 segundos (600, 1320 y 2040 segundos de ensayo), presentándose como resultado la media de las lecturas correspondientes a los últimos 12 segundos.

Protocolo A3.

(Seguido en la determinación de la viscosidad en cales en pasta “recientes” en concentraciones diluidas)

Homogeneización de la muestra.

Previamente a la realización del ensayo se procede a homogeneizar la muestra mediante amasado a 100 rpm durante 5 minutos (Figura 57) para, posteriormente, reposar durante 2 minutos.

Velocidades y secuencia de aplicación del esfuerzo cortante.

Se realizan medidas a velocidad constante de 10 rpm. a lo largo de 600 segundos

Husillo.

Se utilizarán preferentemente el husillo normalizado L3. Si en algún caso la lecturas están fuera del rango de trabajo del husillo L3, se procederá con el siguiente (L2 o L4) pero, en cualquier caso, se dejará constancia del útil empleado.

Tiempo de lectura valor de la viscosidad.

El tiempo para fijar el valor de la viscosidad se fija en 240 segundos, presentándose como resultado la media de las 20 últimas lecturas.

5 Resultados

Seguidamente se muestran los resultados de la campaña experimental agrupados en dos apartados.

En el primero, se presentan y se discuten los resultados referentes a la caracterización de las partículas que componen las cales estudiadas, considerando que se han aplicado diferentes sistemas de medida a cales en pasta, pastas de cal, cales en polvo, nuevas, añejas, etc.

En el segundo apartado se presentan y discuten los resultados correspondientes a las medidas de viscosidad de pastas de cal y cales en pasta.

5.1 Caracterización de partículas

5.1.1 Tamaño de partícula en cales añejas y cales contemporáneas

5.1.1.1 Introducción

Los diferentes procesos de dispersión-agregación y las formas de los diferentes materiales granulares hacen que la consideración del tamaño de partículas sea una cuestión algo más complicada que lo que a simple vista pudiera parecer.

En definitiva se trata de expresar en un único valor cuestiones tridimensionales que pueden resultar más complejas por la propia forma de las partículas o por su rugosidad superficial (Figura 66).

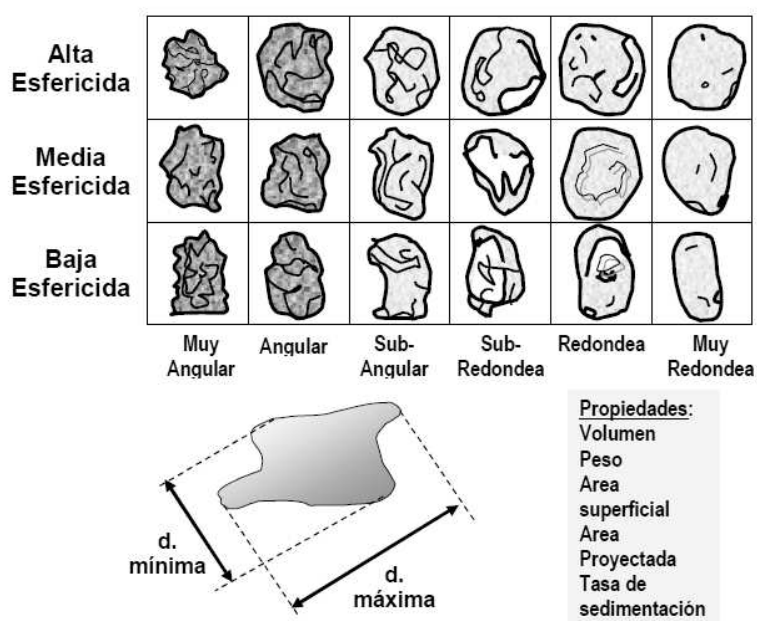


Figura 66 Clasificación esquemática de diferentes granos de arena, extraída de (97).

La forma fundamental por excelencia que puede definirse correctamente a partir de un valor (diámetro) es la esfera. También sería posible utilizar formas de diferentes poliedros regulares pero deberíamos definir previamente que es lo que consideramos “diámetro”.

Por tanto, asociaremos a cada partícula una “esfera equivalente” que, lógicamente, quedará definida por su diámetro. Sin embargo, para cualquier partícula podemos considerar diferentes criterios para asociarle una “esfera equivalente”. Estos pueden ser la esfera de diámetro igual a la mayor dimensión de la partícula (circunscrita), la esfera de diámetro igual a la dimensión menor de la partícula (inscrita), la esfera de igual superficie que la de la partícula, la de igual volumen, la esfera que pasa por la misma mínima apertura de luz de malla, la que presenta la misma tasa de sedimentación en un fluido determinado, etc. (Figura 67).

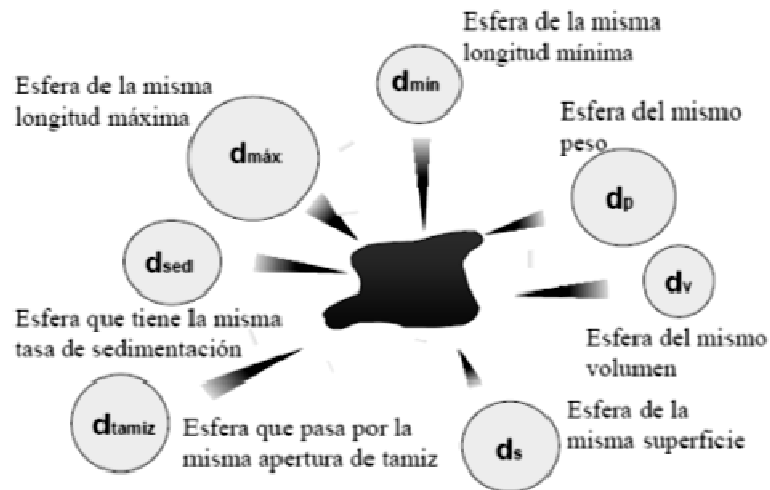


Figura 67 Diferentes esferas equivalentes a una cierta partícula (97).

Al mismo tiempo, otra cuestión estriba en cual ha de ser el valor representativo de un conjunto amplio de partículas de diferentes “tamaños”. Aquí podemos considerar:

$D(1,0) = \Sigma D_i / n$	La media aritmética de los diámetros de cada una de las partículas, lo que sólo haría referencia a la dimensión diámetro de las esferas equivalentes.
$D(2,0) = (\Sigma D_i^2 / n)^{1/2}$	El diámetro correspondiente al valor de la media aritmética de las superficies de las esferas equivalentes.
$D(3,0) = (\Sigma D_i^3 / n)^{1/3}$	El diámetro correspondiente al valor de la media aritmética de los volúmenes de las esferas equivalentes.
$D(3,2) = \Sigma D_i^3 / \Sigma D_i^2$	Diámetro medio “Sauter”, diámetro medio de la superficie equivalente.
$D(4,3) = \Sigma D_i^4 / \Sigma D_i^3$	Diámetro medio “De Brouckere”, diámetro medio del volumen equivalente.

O simplemente considerar la función de distribución resultante de la medición y sobre ella determinar valores estadísticos (media, modas, medianas, cuartiles, percentiles, etc.).

Finalmente también debemos reflexionar sobre que tipo de parámetro resulta más interesante para cada estudio.

A modo de ejemplo en la Figura 68 se muestran las funciones de distribución acumuladas del número de partículas mayores a cada tamaño (A), de las superficies específicas considerando las esferas equivalentes de cada tamaño (B), de los volúmenes de las esferas equivalentes de cada tamaño, en forma acumulada (C) y en forma de distribución no acumulada (D). Todas corresponden a las dos mismas

muestras de cal y las mediciones se han realizado con la técnica de la difracción láser LALLS (Low Angle Láser Light Scattering).

En el citado ejemplo (Figura 68) la cal OG2 presenta:

El 50 % de las partículas son menores a $0.545\ \mu\text{m}$ y el 95 % a $1.520\ \mu\text{m}$ (A)

El 50 % de la superficie específica acumulada se consigue con las partículas menores a $1.26\ \mu\text{m}$, mientras que el 95 % lo definen las partículas menores a $4.66\ \mu\text{m}$. (B)

La moda de los volúmenes definidos por intervalos de los tamaños de partículas se sitúa en $2.31\ \mu\text{m}$ (D) mientras el 50 % de la distribución de volúmenes se encuentra en la suma de todos los tamaños menores a $2.42\ \mu\text{m}$ (C).

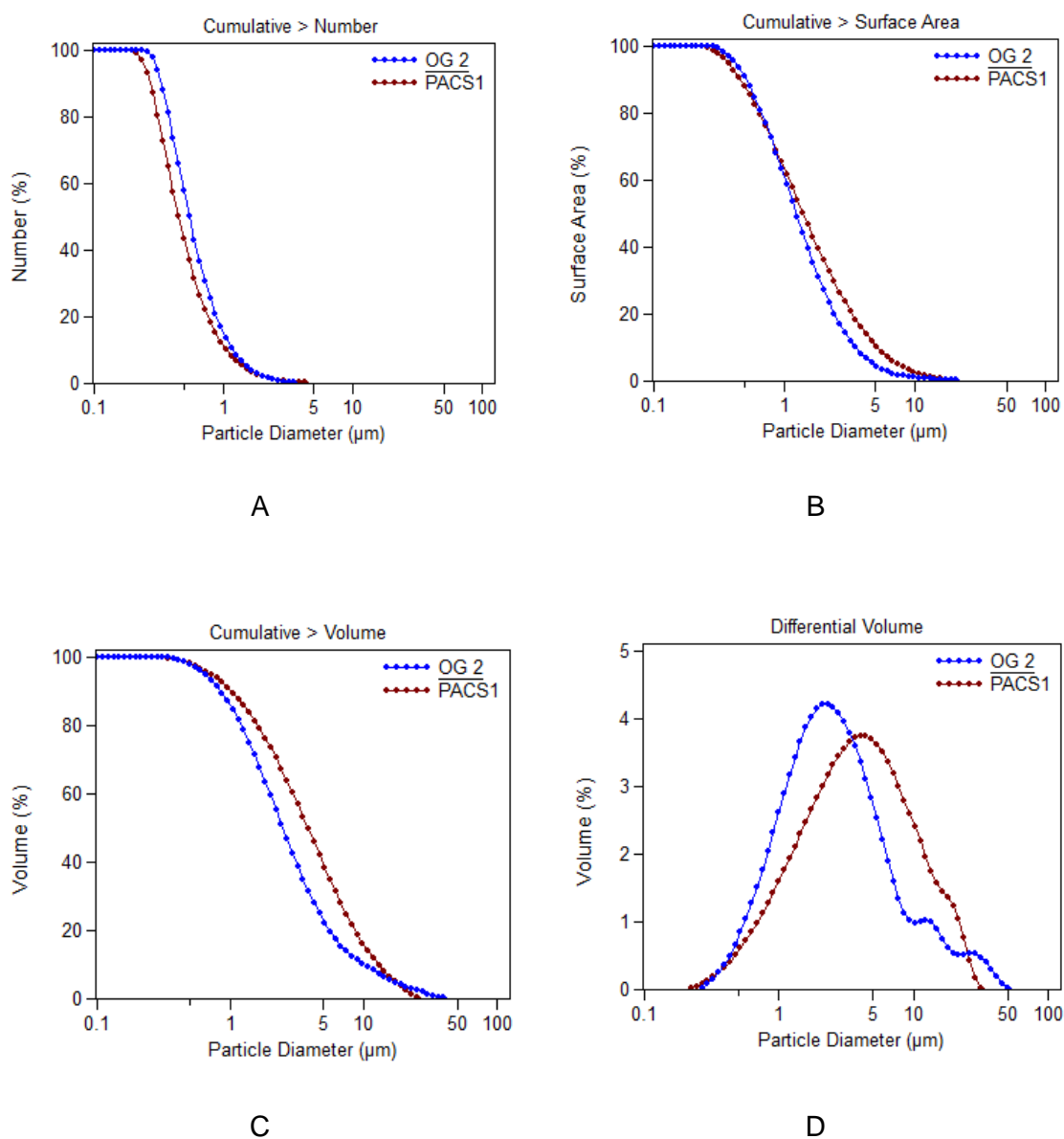


Figura 68 Distintas formas de caracterizar mediante LALLS las dos mismas muestras de cal.

En el presente trabajo se ha optado por utilizar básicamente la representación no acumulada de los volúmenes (D) y los valores de moda (o modas si es polimodal) y de intervalos 5%; 50% y 95%.

Por otro lado hemos de considerar que cada técnica de medida produce una respuesta diferente, dado que realmente está midiendo un parámetro diferente de las partículas.

El sistema técnicamente más sencillo es el tamizado, ampliamente utilizado en la clasificación de muestras de suelos (98) y de áridos para morteros y hormigones. Sin embargo, este procedimiento no es de aplicación a las cales dado que a menudo se trata de discriminar entre partículas menores a las 36 μm , que podemos considerar de forma práctica como el límite inferior de la técnica. Para partículas menores, por ejemplo de arcillas en estudios granulométricos de suelos (99), se utiliza la técnica de la velocidad de sedimentación, basado en la ecuación de la ley de Stokes. Sin embargo esta técnica presenta ciertas limitaciones y de hecho es de aplicación a partículas entre 2 y 50 μm . Además presenta errores notables cuando se aplica a partículas poco parecidas a esferas lisas como es el caso de las cales y también de muchas arcillas.

Frente a estas técnicas (y otras no citadas) podemos contraponer la microscopía electrónica de barrido MEB (Scanning Electron Microscopy SEM), la cual permite ver directamente las partículas. Esta visión resulta a menudo muy interesante dado que puede observarse la forma de las partículas (los cristales de portlandita, en el caso de la cal), pueden realizarse mediciones, etc. Existen autores (100) que concluyen “con respecto a la analítica empleada para la determinación del hábito cristalino de las cales, es más resolutivo el estudio mediante SEM que el realizado mediante DRX”.

Sin embargo se requiere de una preparación de la muestra algo compleja y de operadores muy especializados, que en el mejor de los casos podrán observar una muy pequeña parte de muestra. Pensemos que 0.1 g de partículas de 10 μm de diámetro, de densidad 2.5 g/cm³, contienen 76.5 millones de partículas. Por tanto no resulta la técnica apropiada para medir muestras con una cierta representatividad.

La técnica instrumental conocida como difracción de rayos X (DRX) permite principalmente identificar los distintos compuestos cristalinos existentes en la muestra a través de la interpretación del espectro de reflexiones producidas por la difracción del rayo X aplicado a la superficie de la muestra. Asimismo permite establecer cuáles son los planos cristalográficos desarrollados de forma preferente en las distintas sustancias cristalinas.

En el caso de las cales apagadas, los planos más destacados en que cristaliza la portlandita son los de notación (0001) y (10-11) siendo comúnmente de mayor intensidad el segundo respecto del primero (100).

El análisis de la anchura de los picos a mitad de altura ofrece información sobre el grado de cristalinidad de las fases cristalinas, aunque además de las diferencias de cristalinidad, influyen otros factores como la forma y tamaño de distintas fases minerales, orientación preferencial en algunas de ellas, manipulación previa de las muestras, etc. (101).

Se puede aproximar la proporción de hidróxidos de calcio de hábito planar respecto a otras morfologías (prismática) mediante el parámetro $A(0001)$, calculado según la fórmula (102):

$$A(0001) = \frac{I(0001)}{I(10\bar{1}1)}$$

Siendo $I(0001)$ y $I(10\bar{1}1)$ las intensidades (áreas integradas de cada pico) de las reflexiones más intensas de la portlandita, es decir las que se producen a 18° y $34^\circ 2\theta$.

Algunos autores (55) (103) (46) plantean la idoneidad del parámetro $A_{(0001)}$ como estimación indirecta del grado de envejecimiento de la cal en pasta y, por tanto, de la mejora sufrida en el tiempo, mientras otras fuentes consultadas oralmente cuestionan la robustez de la medida dado que puede resultar muy sensible a la preparación de la muestra previa a la medida, así como parece discutible que un incremento de cristales de hábito laminares frente a los de morfología prismática sea un indicador inequívoco de mayor envejecimiento de la pasta.

La **granulometría láser** por difracción, (Low Angle Láser Ligth Scattering. LALLS) se basa en la medida del ángulo de difracción de una luz láser adecuada a lo largo del paso de las partículas frente a un detector. Se trata de una tecnología ya muy probada y de resultados muy robustos. Tiene un rango de aplicación entre $0.04\ \mu\text{m}$ y $2\ \text{mm}$ que resulta adecuado para el estudio de las cales. Puede medir en dispersión líquida y dispone de un mecanismo de desaglomeración por ultrasonidos. Habitualmente las grandes industrias productoras de cal utilizan estos equipos en sus procesos de control de calidad internos.

Para el presente estudio y tras una campaña de pruebas preliminares, se ha fijado el siguiente protocolo de medición:

- La alícuota se toma pipeteando una cantidad aproximada de cal en pasta, o pasta de cal, entre 0.5 y $1\ \text{g}$ de la muestra una vez homogeneizada por agitación manual. Dicha alícuota se dispersa en un vaso de precipitados con $1\ \text{dm}^3$ de agua destilada comercial.
- Esta mezcla se dispersa, con el agitador del propio Mastersizer, aplicando ultrasonidos a máxima intensidad (intensidad 6) mientras se realiza la extracción continua para la medición, a una velocidad de agitación de $2500\ \text{rpm}$. Para alcanzar esta velocidad se realiza una rampa creciente de velocidad con el fin de no generar burbujas de aire en la dispersión que serían detectadas como partículas de elevado tamaño.
- Una vez estabilizada la lectura se procede a gravar los resultados dos veces consecutivas, utilizando como resultado final de la medición el promedio de ambas lecturas (si son suficientemente cercanas).
- Los parámetros de ajuste del Mastersizer són:
- El dispersante es agua con índice de refracción, $RI = 1.33$,
- El tipo de partícula $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con índice de refracción, $IR = 1.56$
- Índice de absorción se fija en 0.01 .

Así pues, las tres técnicas escogidas para caracterizar el tamaño de las partículas de las cales han sido la DRX, la granulometría láser y la MEB.

5.1.1.2 DRX y granulometría láser. Resultados y análisis.

Se han estudiado 18 muestras de cales distintas, con algunas relaciones entre ellas. Así, una primera partición la forman las cales en pasta respecto de las pastas de cal.

En cuanto a las primeras, hay un amplio grupo de muestras facilitadas por Oriol García (ver 6.2.1 Cales en pasta) de diferentes antigüedades, pero todas ellas apagadas en su taller de Barcelona y procedentes de óxidos de cal de la fábrica de Pachs del Penedes y de la fábrica de Ciaries en Belchite (Zaragoza). Son el grupo nombrado **“OG”** y **“Cal antiga”**. Las cuatro muestras “cal antiga” 1 a 4 provienen de barriles almacenados en el taller del estucador y son restos de una misma confección de una antigüedad superior a 24 años (288 meses). Las otras tres muestras son de fábricas presuntamente distintas y comercializadas bajo diferentes nombres:

- **“Sevilla”**, de Emilio Quílez
- **“Moron”** de Gordillo's
- **“AKRA”** facilitada por la constructora CYES de una obra en Alicante.

En cuanto a las pastas de cal hay dos orígenes, por un lado la muestra **“Pachs 1”** es una pasta preparada en el laboratorio y las 4 muestras **“Calcinor”** provienen de pastas realizadas a partir de hidróxido en polvo de la fábrica Calcasa (Cales de Castilla S.A.) y tienen distintas antigüedades.

A continuación, en la Tabla 15, se encuentran los resultados de las intensidades de las reflexiones I(0001) y la I(10-11) de la DRX y algunos valores de percentiles definitorios de las distribuciones granulométricas.

	CP/PC	Edad meses	DRX			Granulometría laser		
			I[0001]	I[10-10]	A[0001]	<10% μm	<50% μm	<95% μm
OG 1mes	CP	1	157	256	0,61	0,82	3,42	13,84
OG1	CP	9	156	369	0,42	0,84	3,03	29,61
Moron (original)	CP	12	2604	2766	0,94	-	-	-
OG 18	CP	18	98	218	0,45	0,80	2,83	13,04
OG 24	CP	24	153	243	0,63	0,86	3,28	14,79
AKRA	CP	36	525	925	0,57	0,16	1,78	8,60
OG2	CP	48	138	407	0,34	0,85	2,48	19,58
OG 60	CP	60	153	233	0,66	0,86	3,21	18,62
Cal antiga 1	CP	288	184	264	0,70	0,58	2,11	9,38
Cal antiga 2	CP	288	187	343	0,55	0,32	1,71	5,40
Cal antiga 3	CP	288	198	324	0,61	0,55	2,51	9,06
Cal antiga 4	CP	288	200	337	0,59	0,68	2,33	11,69
Sevilla (Quilez)	CP	288	2004	1480	1,35	0,64	3,01	22,92
CALCINOR 1	PC	3	175	389	0,45	1,11	3,82	29,06
Pachs 1	PC	7	219	355	0,62	1,02	3,82	17,22
CALCINOR 2	PC	12	129	314	0,41	1,07	3,56	16,24
CALCINOR 3	PC	14	225	437	0,51	1,21	4,49	27,07
CALCINOR 4	PC	30	305	374	0,82	0,99	3,43	18,03

Tabla 15 Resultados de DRX y ganulometría láser correspondientes a 18 diferentes cales en pasta (CP) y pastas de cal (PC), producidas en España.

El análisis de los resultados permite las siguientes indicaciones:

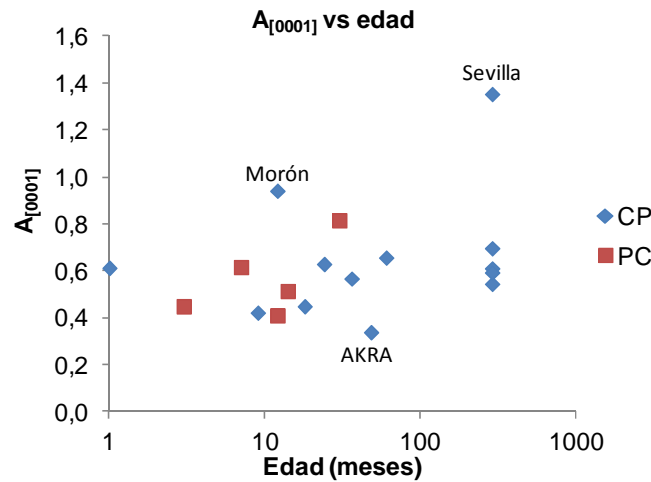


Figura 69 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC) en función de la edad de envejecimiento.

Los resultados obtenidos comparando los valores de $A_{[0001]}$ y las diferentes edades de las pastas (Figura 69 y 70) no muestran una correlación significativa²⁴ ($R^2=0.6$ para las PC y $R^2=0.1$ para las CP) que permita asegurar que el parámetro $A_{[0001]}$ puede ser un indicador determinante de la antigüedad de las cales en pasta o las pastas de cal estudiadas. En cualquier caso los valores obtenidos no son en absoluto coincidentes con los de la Tabla 16 extraída literalmente de (46).

Período de envejecimiento	$A_{[0001]}$
PC	<0.3
CP “fresca”	0.7
CP de 2 meses	1.1
CP de 14 meses	2.0
CP de 14 años	>4.0

Tabla 16 Valores medios de $A_{[0001]}$ para la pasta de cal y la cal en pasta de varias edades (55)

Si segmentamos los datos, reduciéndolos al conjunto de valores provenientes de las muestras del artesano estucador Oriol García OGN (Figura 70), por tanto valores correspondientes a un mismo sistema de apagado aplicado a dos cales vivas distintas, se observa que contrariamente a obtener una relación significativa y creciente entre envejecimiento y valor $A_{[0001]}$, podríamos especular, en sentido contrario, afirmando que el envejecimiento no se observa en variación de $A_{[0001]}$ y que esta variable queda correctamente definida por su media y su dispersión, 0.53 ± 0.13 , para el caso estudiado.

²⁴ R es el coeficiente de correlación de Pearson, R^2 es el coeficiente de determinación

Los cuatro resultados de las muestras “Cal antigua” provenientes de diferentes barriles de almacenamiento de una cal originaria de un mismo apagado son considerablemente homogéneos y responden a un valor de $A_{[0001]}$ promedio de 0.61 ± 0.06 .

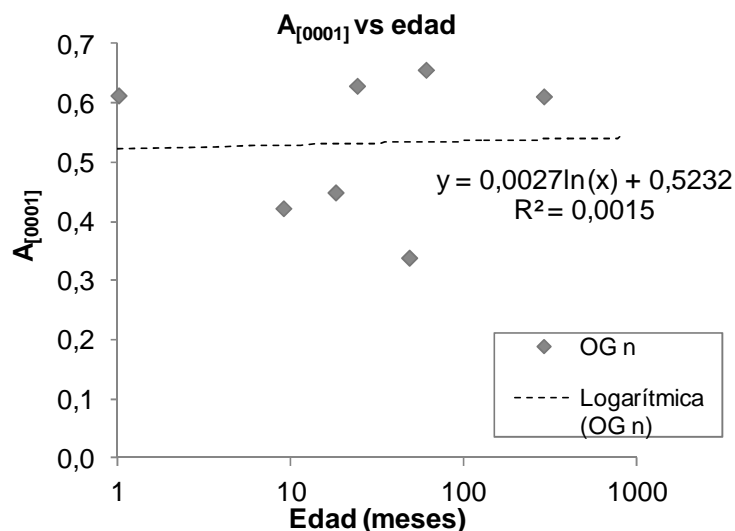


Figura 70 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta OG de diferentes antigüedades en función de la edad de envejecimiento.

Por otro lado los resultados de los análisis granulométricos frente al valor $A_{[0001]}$ y a la edad de envejecimiento (Figura 71 y 73) permiten observar que las pastas de cal (PC) presentan mayores tamaños para los cortes del 10% y del 50% (son más gruesas que las CP) mientras que para el corte 95%, que viene a representar el grado de aglomeración de las partículas, no se observan diferencias remarcables.

Resulta también remarcable el hecho que no se observan correlaciones significativas entre el valor $A_{[0001]}$ y las granulometrías láser.

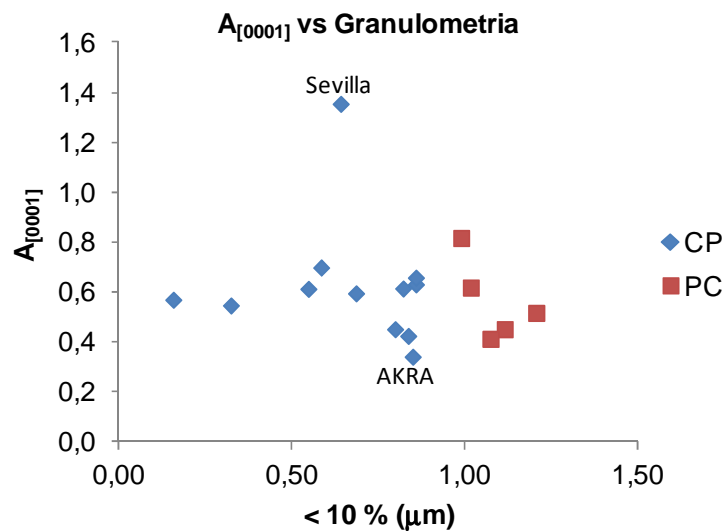


Figura 71 Resultados de $A_{[0001]}$ correspondientes a la cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC) frente al tamaño de partículas expresado en el percentil 10%.

Nuevamente segmentando los resultados de granulometría láser al conjunto de pastas de cal provenientes de la empresa Calcasa (Calcinor n) (Figura 72) no se observan diferencias significativas en los resultados de los distintos envejecimientos.

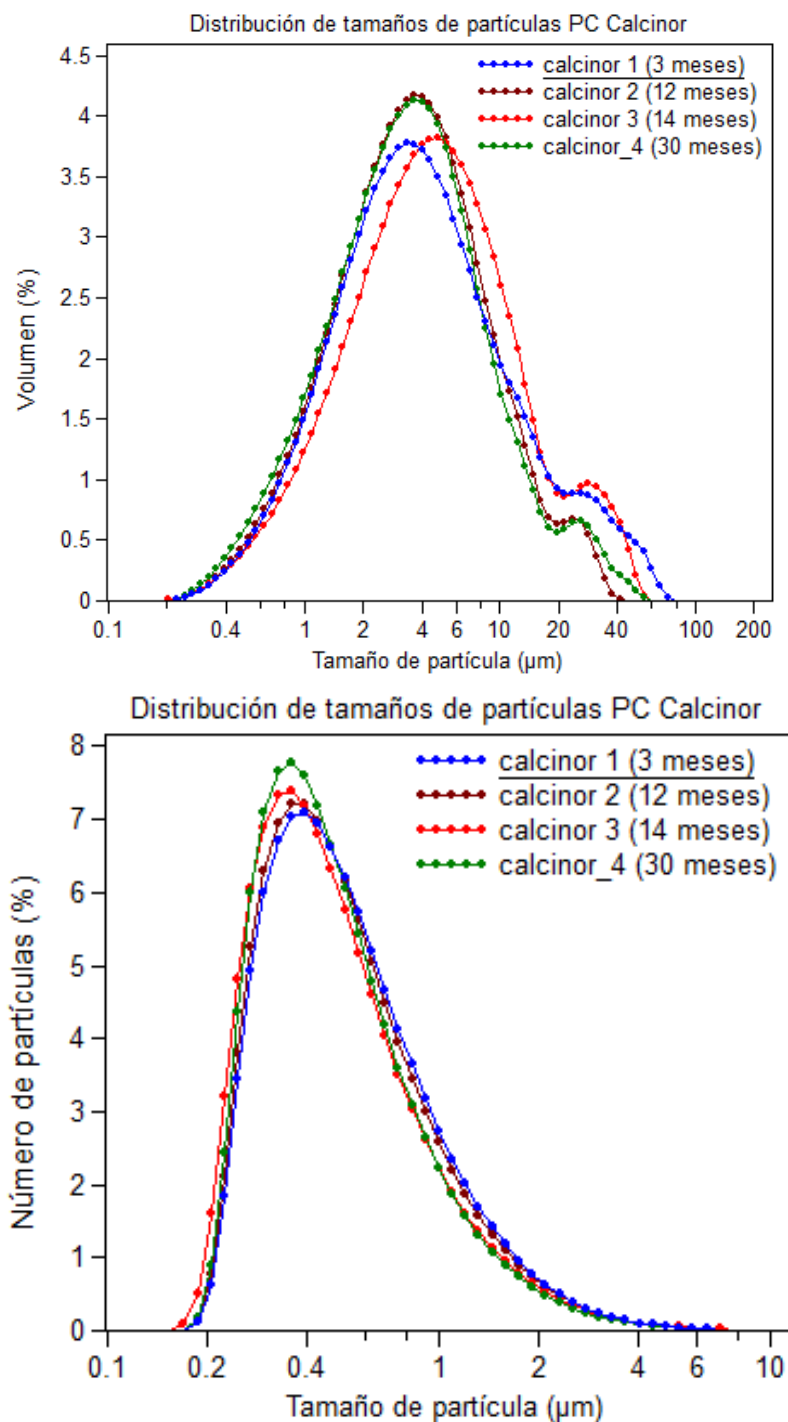


Figura 72 Distribución de tamaños de partículas de las pastas de cal de “Calcinor n”, en volumen y en número de partículas.

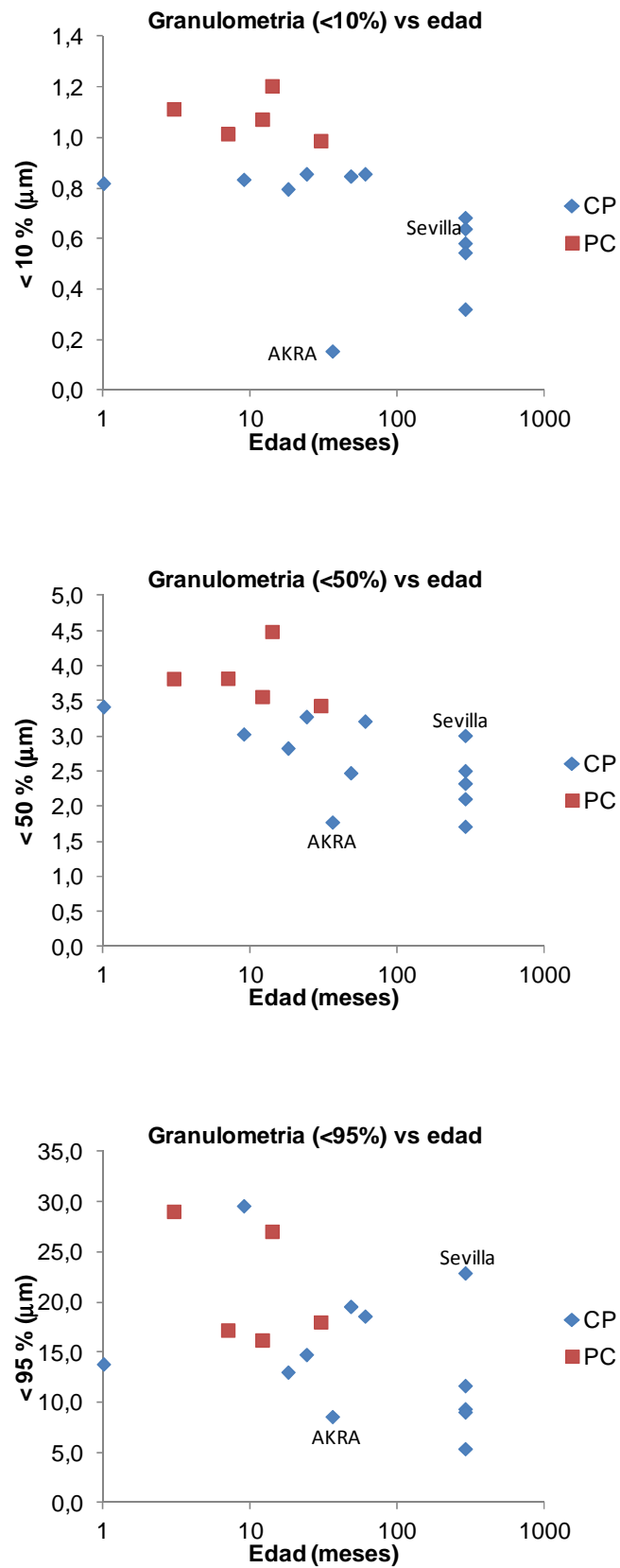


Figura 73 Valores de los percentiles 10, 50 y 95 de los tamaños de partículas frente a la edad de envejecimientos, correspondientes a las cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC).

5.1.2 Influencia del apagado de la cal en el tamaño de partícula

5.1.2.1 Introducción

El conocimiento científico de los mecanismos que rigen el apagado de la cal, así como otras etapas del proceso de cocción y uso, es relativamente reciente teniendo en cuenta la larga tradición del uso de la cal en construcción. Por este motivo, la mayoría de profesionales y técnicos del sector se apoyan en la experiencia y el oficio de artesanos y aplicadores, agentes clave para el éxito de este material.

Lamentablemente, este conocimiento tradicional de los métodos y del oficio va desapareciendo, aunque sí es cierto que todavía existen pequeñas instalaciones industriales que apagan cales vivas mediante sistemas básicamente tradicionales con la introducción, eso sí, de ligeros mecanismos automatizados.

En este apartado se han estudiado las características de diferentes métodos de apagado tradicionales aplicados a 4 cales distintas, así como la influencia de estos en algunas características de las cales en pasta resultantes.

Las cuatro cales escogidas han sido:

- Cal artesanal realizada en **Zone** (Italia)
- Cal artesanal preindustrial realizada en **Morón** (Sevilla, España)
- Cal industrial apagada en balsa por **Unicmall** en Mallorca (España)
- Cal apagada artesanalmente en balsa por **Oriol García** en Barcelona (España)

5.1.2.2 Apagados de una cal dolomítica en Zone, Italia

Los distintos apagados tradicionales se llevaron a cabo en julio de 2009 en Zone (Italia) en el marco de un workshop organizado por el Forum Italiano de la Calce (104). La organización del taller nos invitó a asistir a la segunda parte del evento. En la primera, se cargó un horno tradicional restaurado en 1997 por los hermanos Cagni Muri y se produjo la calcinación. En la segunda parte, una semana más tarde, se procedió al apagado por tres métodos diferentes, de la cal obtenida.

Nos plantemos aprovechar la ocasión para estudiar los materiales obtenidos así como para investigar cómo afectan los diferentes sistemas de apagado al producto final.

No teníamos constancia que un estudio de este tipo, en el que la única variables fuese el sistema de apagado tradicional, se hubiera realizado anteriormente.

Materiales utilizados

La materia prima para el apagado fue obtenida por calcinación de rocas dolomíticas de la zona. La piedra que se utilizó como materia prima fue una dolomía, del norte de Italia, región de la Lombardía. Es una zona prealpina, de edad geológica Noriense, que se presenta en bancos muy compactos, sin apenas estratificación. Atendiendo a los fósiles que contiene (lamelibranchios, gasterópodos y corales), se considera que se formó en un ambiente marino de poca profundidad, y aguas cálidas. La FRX del polvo obtenido en la cantera, de un promedio de 250 análisis realizados en el 2012 y facilitada por el Dr. Massimo Pavarani, responsable de la cantera Dolomite Franchi S.p.A, es la siguiente:

Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	MnO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Pérdida al fuego (%)
0.05	30.77	0.16	21.42	0.0082	0.07	47.51



Figura 74 Vistas superior e inferior del horno.

Técnicas tradicionales de apagado de la cal

Apagado por aspersión (Z2)

El método de apagado por aspersión consiste en extender cal en terrones y regarlos progresivamente con agua. Para facilitar la hidratación y la homogeneidad de la pasta resultante se suele proceder a un cierto amasado. Este proceso se produce en una balsa de apagado.

En el caso concreto descrito (codificado como Z2) el proceso consistió en extender la cal en terrones en una balsa de madera de unos 3 x 6 m y 0,4 m de altura, desechando las piedras aparentemente mal cocidas y las impurezas (Figura 75). A continuación se regó abundantemente la cal, tal y como se muestra en la Figura 76, se desmenuzaron los fragmentos más grandes con la ayuda de palas de madera para facilitar la mezcla y la disgregación de los terrones, produciéndose así el proceso de apagado. Los “grappiers” y las impurezas se eliminaron por tamizado en continuo, a continuación se decantó la pasta de cal y se clasificó por tamaños en dos fases según la sedimentación.



Figura 75 Balsa de apagado al inicio del proceso.



Figura 76 Proceso de apagado por aspersión.

Grande Aqua (Z3)

En este caso (codificado como Z3) se excavó un pequeño pozo en el suelo de dimensiones aproximadas 1,2 x 0,6 m y 1 m de profundidad que se llenó, hasta la mitad, con las piedras calcinadas procedentes del horno de cal. Se vertió en el pozo una cantidad aproximada de 200 litros, y se esperó a que la cal empezase a bullir. Pasados unos minutos se vertieron otros 400 litros y se removió la pasta de cal, como puede observarse en la Figura 77. En algunas experiencias previas realizadas con este sistema, la exotermia inicial del proceso ha provocado una explosión de cierta virulencia.



Figura 77 Proceso de apagado “Grande aqua”.

Inmersión breve (Z4)

Se trata de uno de los procedimientos tradicionalmente usados para la obtención de cal en polvo. Se basa en suministrar al producto calcinado una cantidad tal de agua que resulte suficiente para la hidratación pero insuficiente para formar una pasta. La propia exotermia del proceso evapora el exceso de agua y el vapor generado, a su vez, colabora en el apagado de las partículas que resten anhidras. Actualmente este principio se utiliza industrialmente para la fabricación de la cal en polvo con la utilización de apagadores industriales.

En la Figura 8 se muestra un ingenio extraído del libro “Manual de construcción de albañilería” de Espinosa de 1859 que proporcionaba cales apagadas en polvo conseguidas a partir de un proceso de inmersión breve seguido de un estacionamiento en un recipiente que debía concentrar el vapor generado i conservar altas temperaturas durante un cierto tiempo.

Este tercer sistema de apagado estudiado durante la jornada consistió en llenar de cal en terrones de dimensiones reducidas (3 a 10 cm), un cesto de mimbre hasta completar unos 10/12 litros, e introducirlo en un pozo de agua hasta su completa inmersión, como se muestra en la Figura 78. El cesto se retiró casi inmediatamente y se dejó a la intemperie mientras la cal se hidrataba, aumentando de volumen y temperatura durante un proceso que puede llegar a durar varias horas (codificado como Z4).



Figura 78 Apagado por inmersión breve.

Campaña de experimentación

La campaña de experimentación “in situ” consistió en la medición de las temperaturas generadas en los diferentes procesos de apagado mediante la instrumentación con termopares y las lecturas a distancia con una cámara de termovisión. Asimismo se tomaron muestras de los tres productos de hidratación generados, así como de la cal en terrones, para su caracterización en laboratorio. Algunas de las determinaciones efectuadas se repitieron 3 años más tarde para constatar el proceso de envejecimiento.

A fin de completar el estudio se realizó el apagado de la piedra calcinada en Zone (Z1) en el laboratorio, variando las relaciones en peso de agua y cal (2:1; 3:1; 4:1 y 5:1) y controlando las temperaturas de apagado. Las características de las pastas resultantes se analizaron de la misma manera que para las pastas obtenidas en los procesos tradicionales.

La Tabla 17 muestra la nomenclatura, proceso de apagado y tipo de cal de las distintas muestras estudiadas. En todos los casos el material de partida ha sido la piedra calcinada en el horno tradicional de Zone (Z1).

Muestra	Proceso de apagado	Tipo de cal
Z2	Por aspersión	Cal en pasta
Z3	“Grande aqua”	Cal en pasta
Z4	Immersion breve	Cal en polvo
Z1 1:2	Lab, Relación: 2:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:3	Lab, Relación: 3:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:4	Lab, Relación: 4:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:5	Lab, Relación: 5:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta

Tabla 17 Identificación de las muestras.

El registro de las temperaturas de apagado Figura 79, tanto in situ como en laboratorio, se realizó mediante un conjunto de termopares tipo K conectados a un dispositivo de almacenamiento de datos. Durante los apagados tradicionales se usó también un equipo de termovisión InfraCAM SD de FLIR Systems, que permite medir la radiación infrarroja producida por un elemento entre -15 y 350°C. El receptor de infrarrojos se ajustó para una emisividad de 0,98.



Figura 79 Mediciones de temperaturas con termopares y termovisión, al inicio del apagado.

Para caracterizar las muestras de cal se utilizaron las técnicas descritas en 4.3 *Equipos y técnicas experimentales*.

Las medidas de viscosidad de las calces en pastas Z2 y Z3 se han obtenido con un viscosímetro rotacional Thermo Haake Viscotester 7L Plus posteriormente a dispersar las muestras en agua hasta un 30 % de contenido sólido. La lechada resultante ha sido homogeneizada durante 5 minutos, para reposar posteriormente por 2 minutos y analizada usando los vástagos L3 y L4. Corresponde al Protocolo A3 (4.3.2.4 *Metodología seguida para la medida de la viscosidad*)

La primera serie de medidas de viscosidad se realizan a una edad de tres meses mediante un proceso consistente en someter la muestra a la homogeneización inicial para, posteriormente y durante 4 minutos, aplicar una rotación de 10 r.p.m. tomando datos de tiempo (s.), tensión aplicada (Pa) y viscosidad (Pa.s). El valor de la viscosidad se determina a partir del promedio de los últimos 20 seg.

Resultados y análisis

Evolución de las temperaturas durante el apagado de la cal

La Figura 80 muestra las temperaturas de la cal viva momentos antes de sacarla del horno de calcinación. A pesar de llevar una semana apagado se puede observar en la termografía que la roca calcinada todavía conserva temperaturas próximas a los 90°C.

En el transporte a la balsa de apagado se enfría hasta una temperatura alrededor de 50 °C.

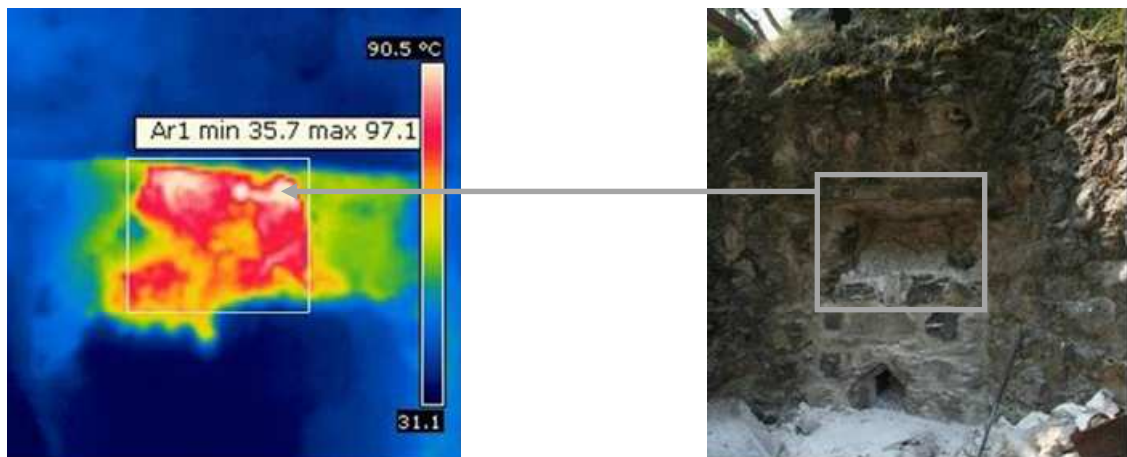


Figura 80 Termografía correspondiente a la zona de descarga del horno.

Apagado por aspersión en balsa de madera (Z2)

Como se puede observar en la Figura 81, el proceso de apagado por aspersión comporta una heterogeneidad en cuanto a las temperaturas registradas, relacionadas con la cantidad de agua. En aquellas zonas en las que la cal está completamente anegada, el calor se disipa rápidamente por lo que las temperaturas registradas son más bajas, mientras que en aquellas zonas no anegadas, las temperaturas son superiores, alcanzando en algunos puntos más de 100°C.

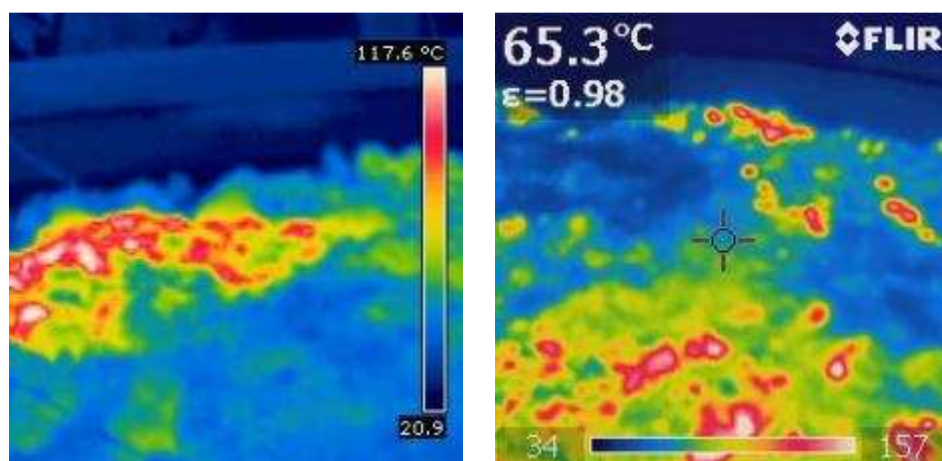


Figura 81 Termografías de la balsa de madera durante el apagado de la cal.



Figura 82 Detalle de las temperaturas alcanzadas durante el apagado en balsa, se alcanzan hasta 99°C.

En cambio, durante el proceso de decantación y antes del tamizado de la lechada de cal, tanto las lecturas con la cámara termográfica, Figura 83, como las lecturas de los termopares, Figura 84) muestran unas temperaturas muy homogéneas y que oscilan entre los 40/50 °C.

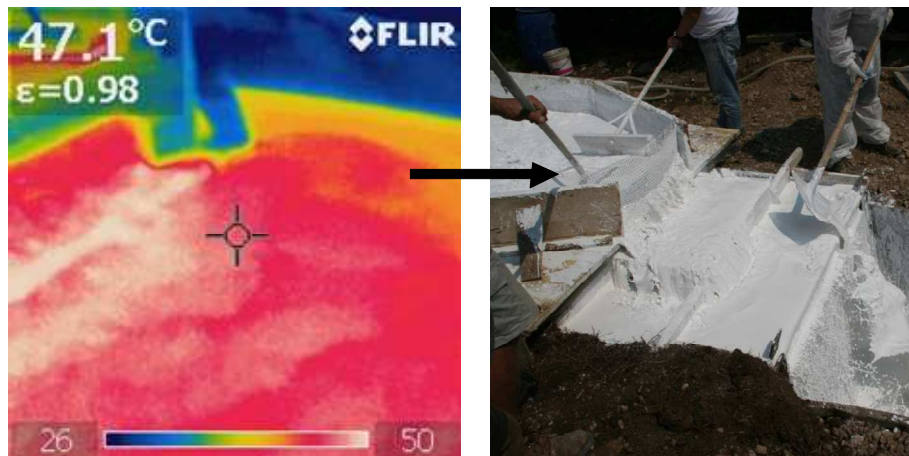


Figura 83 La temperatura de la pasta de cal una vez homogeneizada en la balsa ronda los 50°C.

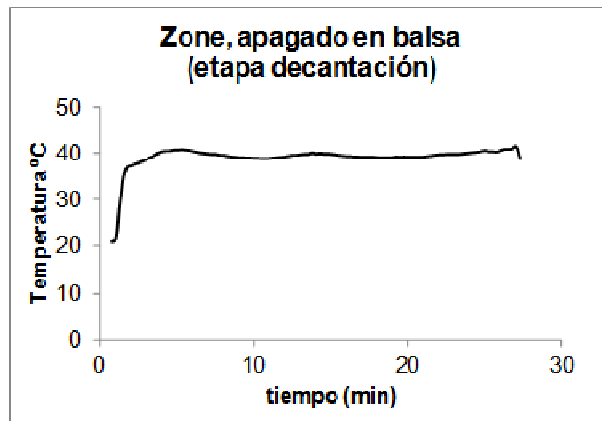


Figura 84 Evolución de las temperaturas durante la etapa de decantación del apagado en balsa.

Apagado Grande Aqua (Z3)

En este caso las temperaturas de apagado alcanzan los 100°C cuando se produce el primer contacto entre el agua y la cal viva, pero el exceso de agua que se añade al proceso causa una rápida disipación del calor e incluso una reducción de la temperatura al remover la pasta de cal (Figura 85). Al cabo de unos minutos la temperatura se estabiliza en torno a los 40°C si bien con el paso del tiempo se observó un aumento de temperatura constante, que se midió a lo largo de más de una hora, tal y como se muestra en la gráfica presentada en la Figura 86.

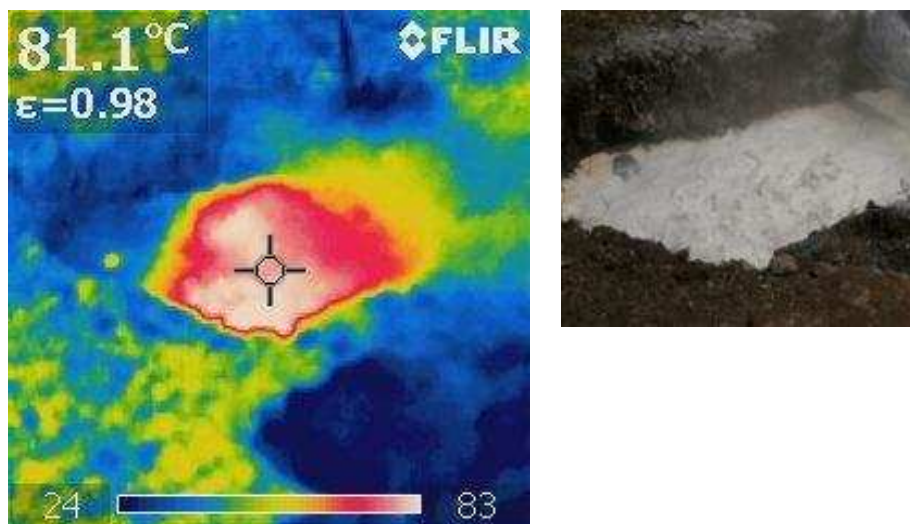


Figura 85 Termografía del proceso de apagado “Grande Aqua”.

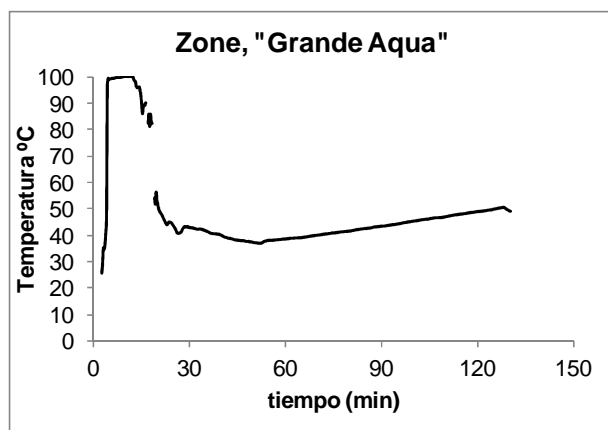


Figura 86 Evolución de las temperaturas durante el proceso de apagado “Grande Aqua”.

Apagado por inmersión breve (Z4)

A diferencia de los dos casos anteriores el producto resultante de este apagado no es una cal en pasta, sino cal en polvo. La escasez de agua utilizada en este proceso explica las altas temperaturas que se generan en el interior de la masa que llegan hasta los 350°C, temperatura considerada límite para el inicio del proceso de deshidratación de la posible brucita generada (46)(Figura 96), y que se mantienen por encima de los 100°C a lo largo de las 3,5 horas siguientes desde el inicio del proceso (Figura 87).

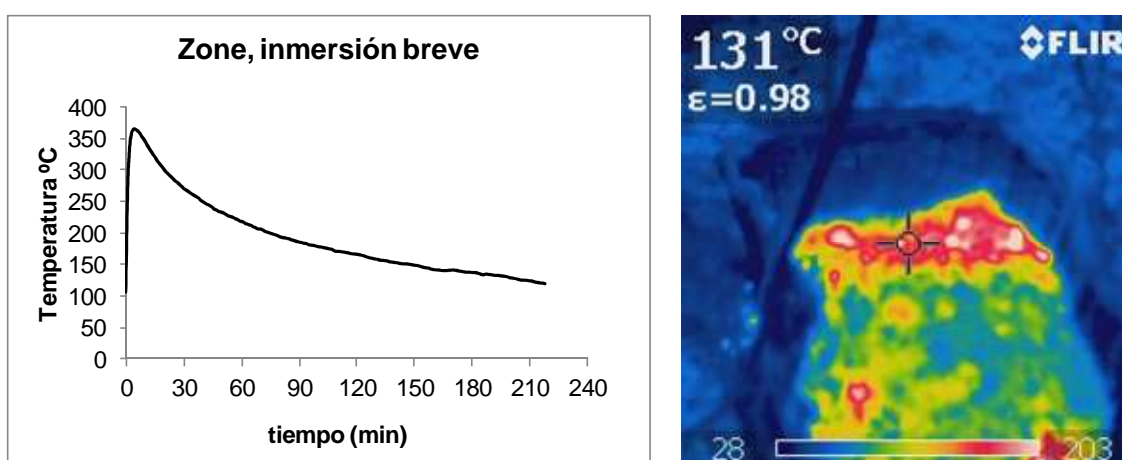


Figura 87 Evolución de las temperaturas durante el proceso de inmersión breve.

Apagado en laboratorio

En los procesos de apagado realizados en laboratorio a partir de las muestras Z1 se han aplicado termopares al tiempo que se producía una ligera agitación por mezcla. La temperatura máxima alcanzada disminuye con el aumento del agua añadida, pero en ningún caso se superan los 75 °C para las distintas relaciones cal/agua estudiadas (Figura 88). La reactividad es menor (menos rápida) a la mostrada “in situ”, lo que se atribuye a la diferente temperatura de la cal en terrones.

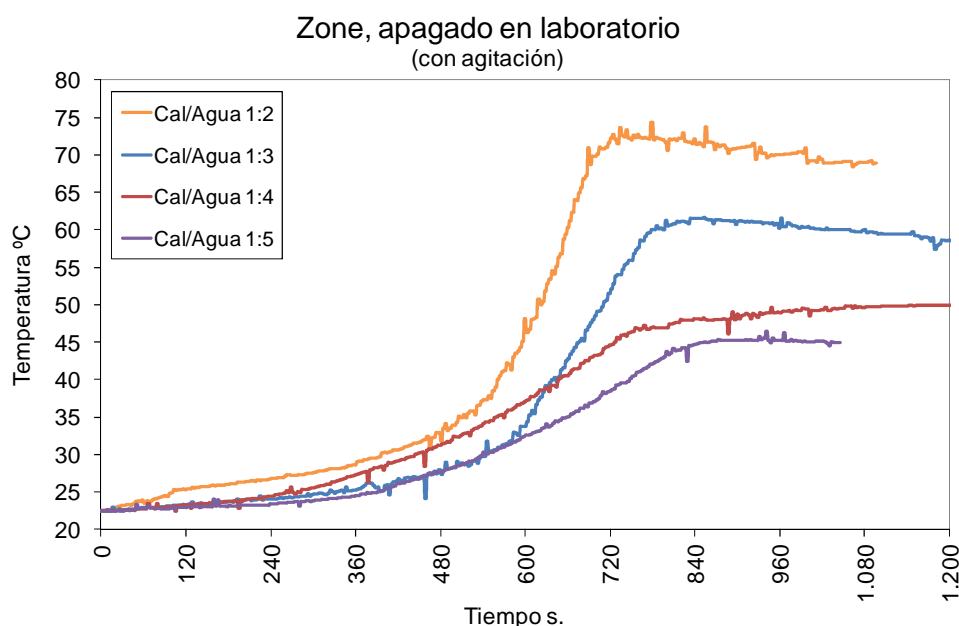


Figura 88 Evolución de las temperaturas de apagado para diferentes ratio de agua/cal.

Caracterización de las cales

El análisis por FRX de la muestra Z1, obtenida por calcinación de roca dolomítica en horno tradicional, revela la presencia mayoritaria de calcio y magnesio. La composición expresada en forma de porcentajes de óxidos es de 57 % de CaO y de 38 % de MgO.

Los espectros de DRX de las muestras apagadas in situ se presentan en la Figura 89 y la Figura 90. En todos los casos la fase cristalina principal se corresponde con el hidróxido de calcio (portlandita). Asimismo, en los espectros de las muestras Z2 y Z3 también aparecen los picos característicos de hidróxido de magnesio (brucita), mientras que para Z4 se distinguen los óxidos de magnesio originales (periclase) y no se detectan hidróxidos de magnesio. Este hecho puede explicarse en relación con la diferente cinética de hidratación del CaO y del MgO. La hidratación de la cal viva para formar Ca(OH)_2 es más rápida que la hidratación de la periclase (MgO) como ocurre a través de un mecanismo que implica cuatro fases (105). Si se produce una falta de agua durante el apagado, como sucede en el caso del proceso por inmersión breve (Z4), puede verse favorecida la formación de Ca(OH)_2 frente a la de Mg(OH)_2 , que aún en el caso improbable que pudiera formarse, se deshidrataría parcialmente al haberse superado en determinadas zonas la temperatura de deshidratación de la brucita.

Por otro lado, la hidratación lenta de la periclase puede explicar el incremento diferido de temperatura observado para la muestra Z3, obtenida mediante el proceso de apagado “grande agua” (Figura 86). En este caso, la adición súbita de gran cantidad de agua y la ausencia de agitación puede provocar que las partículas de CaO, más reactivas, se hidraten antes y, en consecuencia, los núcleos de MgO lo hagan de forma diferida y de manera menos exotérmica.

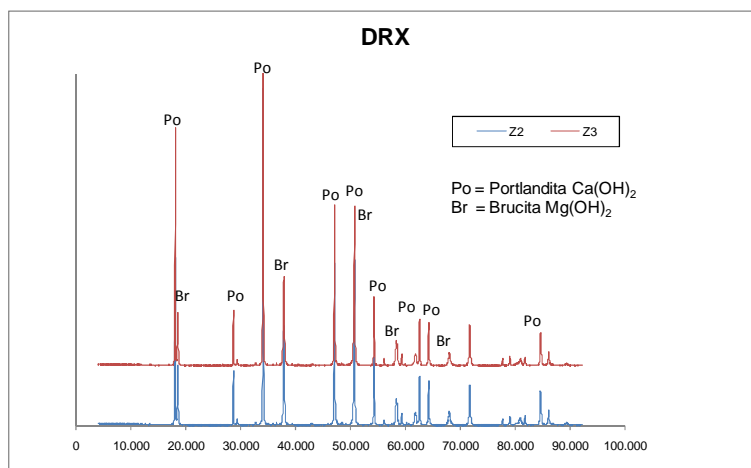


Figura 89 Difractograma de las muestras de cal Z2 y Z3 previamente secadas en atm. N_2 .

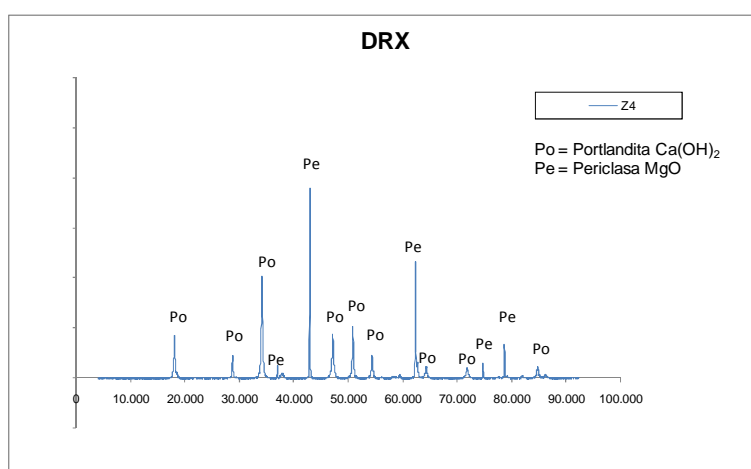


Figura 90 Difractograma de la muestra Z4 se observan picos de cal viva y periclase.

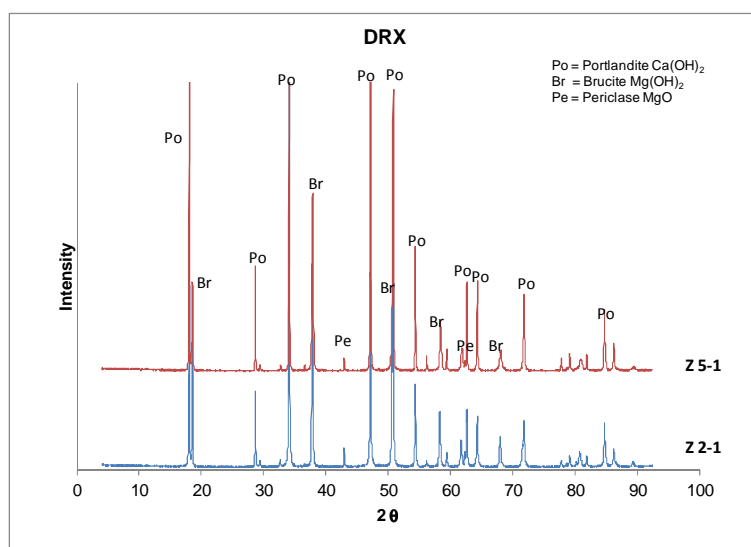


Figura 91 Difractograma de la muestra Z1 apagada en laboratorio con una relación cal/agua en peso de 2 (Z 2-1) y 5 (Z 5-1).

Los difractogramas de las muestras apagadas en laboratorio (Figura 91) muestran cualitativamente trazas de periclasa y gran cantidad de brucita. Analizando los dos extremos de relación cal/agua, (1/2 y 1/5), no puede apreciarse una diferencia substancial en la cantidad de periclasa no hidratada, a pesar de la gran diferencia de agua utilizada. Comparando los resultados de las muestras hidratadas “grande agua” *in situ* y en laboratorio, para todas las diferentes relaciones agua/cal, se aprecia que el factor diferenciante es la presencia de periclasa, que se puede atribuir a diferencias en las condiciones de apagado y de tiempo de permanencia en agua, entre los procesos “in situ” y en laboratorio.

La Figura 93 muestra la distribución volumétrica del tamaño de partículas para las muestras Z2 y Z3 y para las dos fracciones de tamizado secas de las muestras Z4: Z4.1 (> 80µm) y Z4.2 (< 80µm). Como puede observarse en el cuadro de la figura, el proceso de apagado por inmersión breve da lugar a mayores tamaños de partícula, mientras que el sistema de apagado por aspersión, con grandes aportaciones de agua, agitación y decantación, proporciona valores de tamaño de partícula inferiores. Aunque se han podido observar partículas pequeñas (<3 µm) en todas las muestras, la amplia distribución del tamaño de partículas, con colas de distribución superiores a 10 µm, se debe probablemente a la existencia de aglomerados, excepto en la muestra Z4-1. Especialmente relevante en el apagado Z3, donde se dan las dos causas principales de la aglomeración: la falta de agitación en el proceso de apagado y la probable presencia de puntos calientes junto a un proceso de enfriamiento comparativamente muy lento.

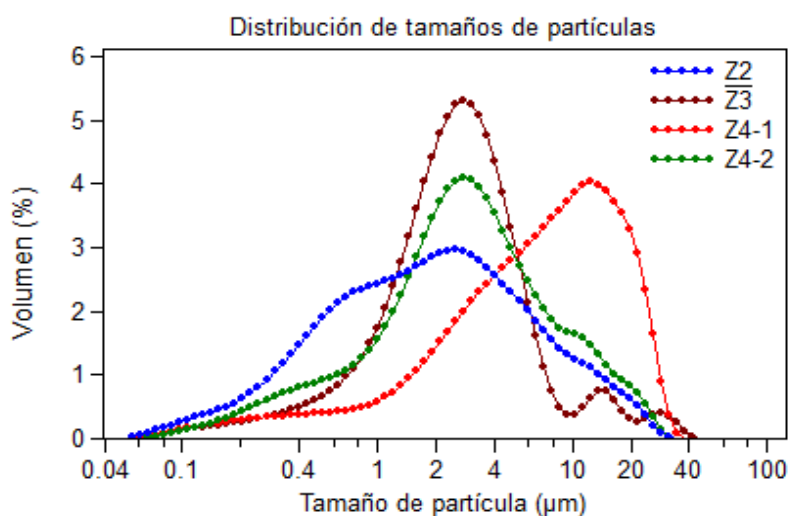


Figura 92 Curvas de distribución de tamaños de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone.

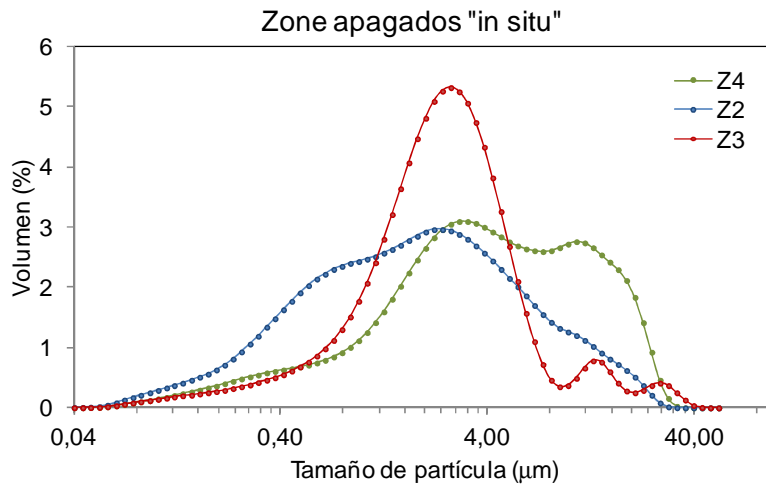


Figura 93 Curvas de distribución de tamaños de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone (Z4 agregada).

	< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 95 %
Z 2	0.36	0.76	1.91	4.39	13.89
Z 3	0.77	1.52	2.57	4.07	12.99
Z 4-1 (>80 µm)	1.16	3.16	7.30	13.53	23.04
Z 4-2 (<80 µm)	0.57	1.47	2.87	5.47	15.44 µm

Tabla 18 Valores de los cuantiles de los tamaños de partículas, de las diferentes muestras de cal apagadas en Zone.

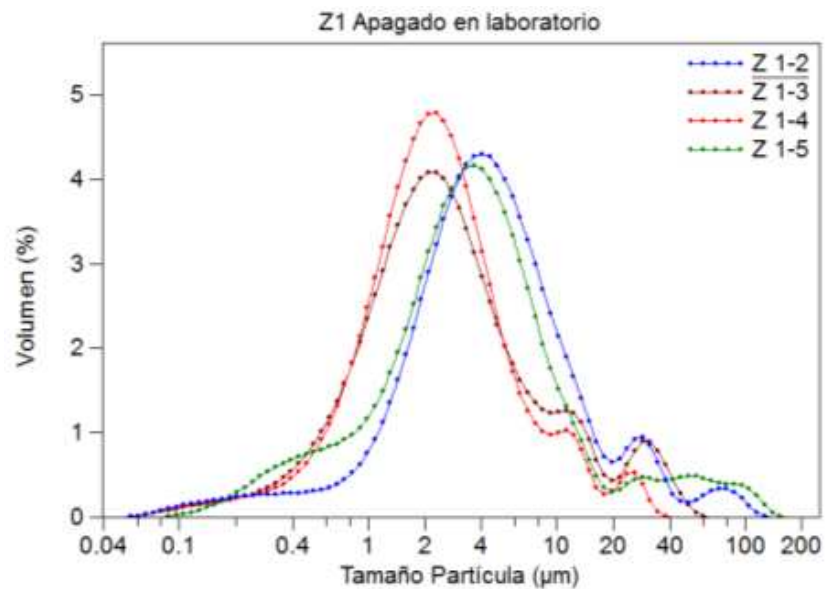


Figura 94 Curvas de distribución de tamaños de partículas para las muestras apagadas en laboratorio.

	< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 95 %
Z 1-2	1.23	2.35	4.22	7.85	16.33
Z 1-3	0.71	1.32	2.42	4.96	12.71
Z 1-4	0.75	1.31	2.25	3.89	7.77
Z 1-5	0.71	1.41	2.64	4.62	7.83 µm

Tabla 19 Valores de los cuantiles de los tamaños de partículas, de las diferentes muestras apagadas en laboratorio.

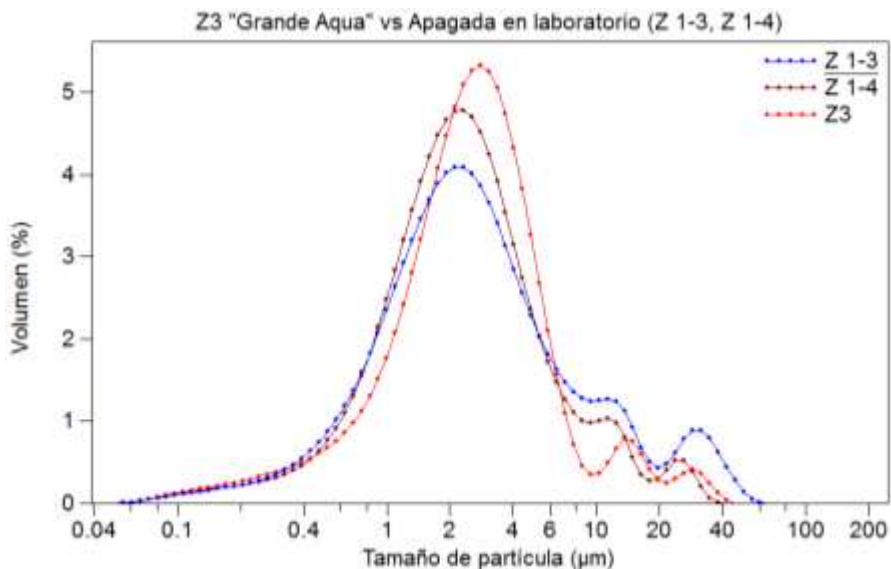


Figura 95 Z3 vs apagadas en laboratorio.

Los resultados de caracterización del tamaño de partícula de las muestras apagadas en laboratorio (Figura 94,

Tabla 19) muestran distribuciones similares para las relaciones cal/agua 1/3, 1/4 y 1/5, pero se observan distribuciones de partículas de mayores tamaños para el apagado con menor cantidad de agua (1/2). También son muy similares los resultados "Grande Aqua" *in situ* y en laboratorio (1/3 a 1/5).

En todas las muestras se observan en las distribuciones de tamaños de partículas, colas de tamaños superiores típicas de aglomeraciones, perfectamente atribuibles a la falta de agitación en el ensayo comparativo de apagado.

La medida de la superficie específica BET ha presentado para las muestras Z2, Z3 y Z4 respectivamente los valores de 11.4, 11.9 y 13.5 m²/g. Se trata de valores en un rango intermedio y muy similares entre sí, máxime considerando que las muestras provenientes de pastas no fueron liofilizadas (60) para no forzar una desagregación que en la práctica de uso del material no se producirá.

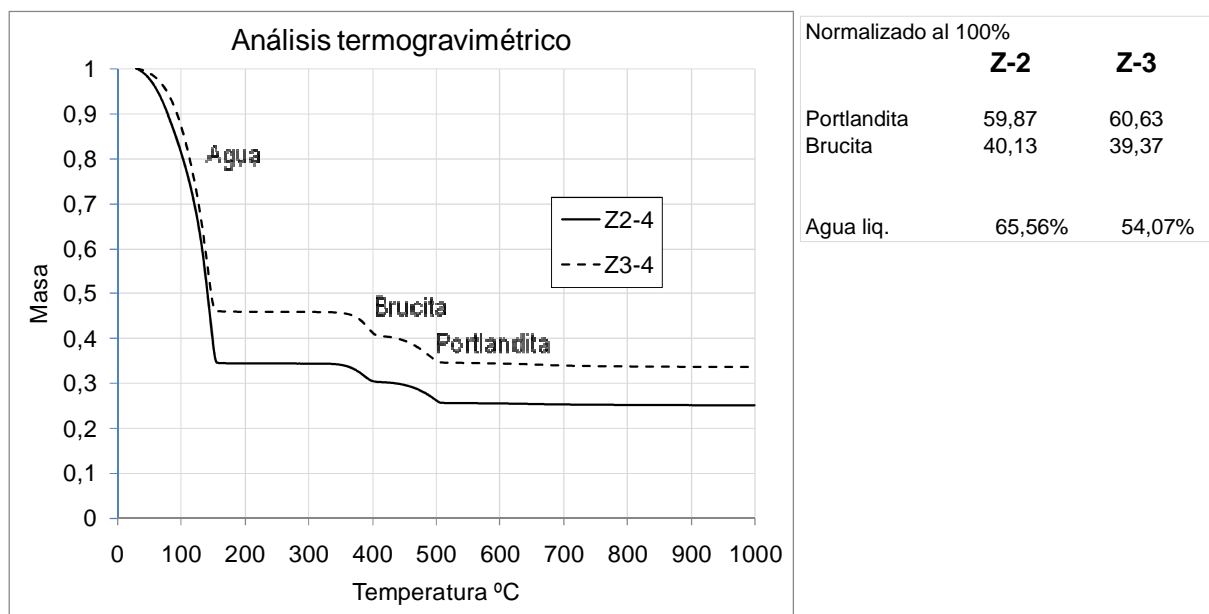


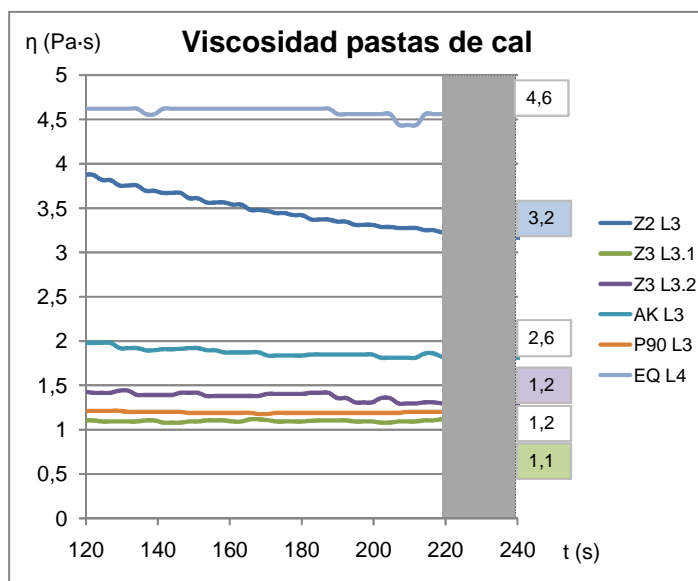
Figura 96 Curvas de pérdida de masa frente a la temperatura de las pastas de cal Z2 y Z3.

El análisis termogravimétrico de las muestras Z2 y Z3 (Figura 96) pone de manifiesto un primer salto alrededor de 100 °C correspondiente al agua presente en la pasta de cal. A continuación distinguimos, en los dos casos, una pérdida de peso aproximadamente a 340 °C y otra alrededor de 450 °C. Estas descomposiciones corresponden a la deshidratación del hidróxido de magnesio y del hidróxido de calcio respectivamente.

La cuantificación de los porcentajes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y agua de cada muestra revelan una mayor cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y agua en la muestra Z2. Este hecho se podría relacionar con una intercalación mayor de agua en la estructura del hidróxido cuando el apagado se produce bajo condiciones menos agresivas.

Los registros de viscosidad que se muestran en la Figura 97, revelan que pasados los tres meses de edad, la muestra Z2 tenía una viscosidad significativamente superior a la de la muestra Z3, comparable con las de otras cales más añejas.

Las determinaciones de viscosidad a los tres años de almacenamiento de las muestras en inmersión en agua en laboratorio, mostraron un aumento muy significativo (Figura 98). El valor de viscosidad determinado para el intervalo de tiempo de ensayo entre 220 y 240 segundos, fue de 2.20 Pa·s, mientras que la misma muestra con sólo tres meses de edad (Figura 97) presentaba una viscosidad comparable de alrededor de 1.20 Pa·s.



Muestra	Vástago	Torque medio (mPa)	Torque final (mPa)	Viscosidad dinámica media (mPa·s)	Viscosidad dinámica final (mPa·s)
EQ	L4	45800	45600	4580	4560
Z2	L3	34480	31680	3450	3170
AK	L3	18630	18120	1860	1810
Z3.2	L3	13600	31680	1360	1370
P90	L3	11950	12120	1200	1210
Z3.1	L3	10970	11160	1100	1120

Figura 97 Resultados de las medidas de viscosidad. La muestra EQ corresponde a una cal caliza en pasta de 25 años de envejecimiento, la muestra AK corresponde a una cal caliza en pasta de 3 años de envejecimiento y la muestra P90 corresponde a una cal en polvo CL.

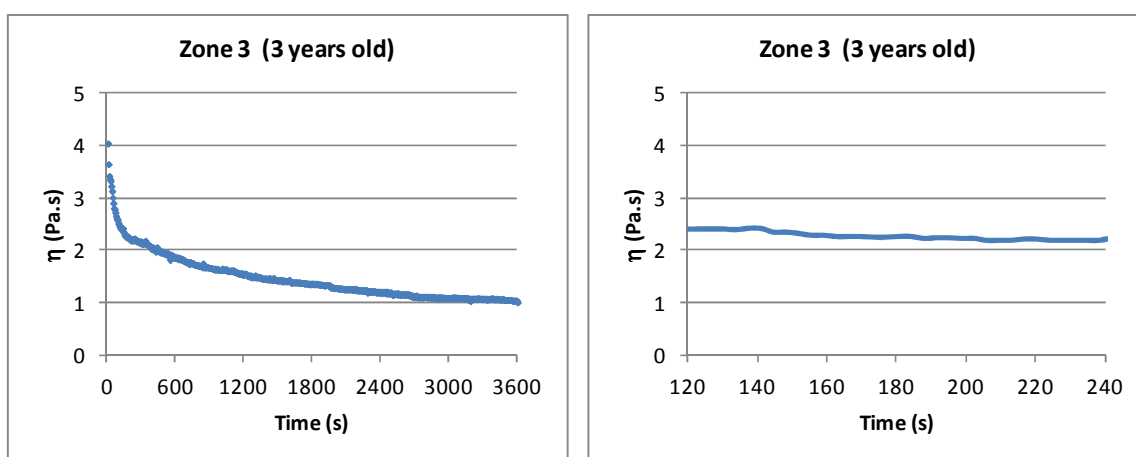


Figura 98 Resultados de la medida de viscosidad de la muestra Z3 a la edad de 3 años, conservada en laboratorio en inmersión de agua.

5.1.2.3 Apagados realizados por Gordillo's en Morón de la Frontera (España)

Materia prima y calcinación

La materia prima utilizada habitualmente es una caliza cercana a la zona. Se trata de una caliza oolítica, de edad Jurásico medio (Dogger), de una porosidad alrededor del 12%, formada por oolitos (envueltas calcáreas rodeando a un pequeño cristal detrítico), cementados por cristales de calcita bien desarrollados.

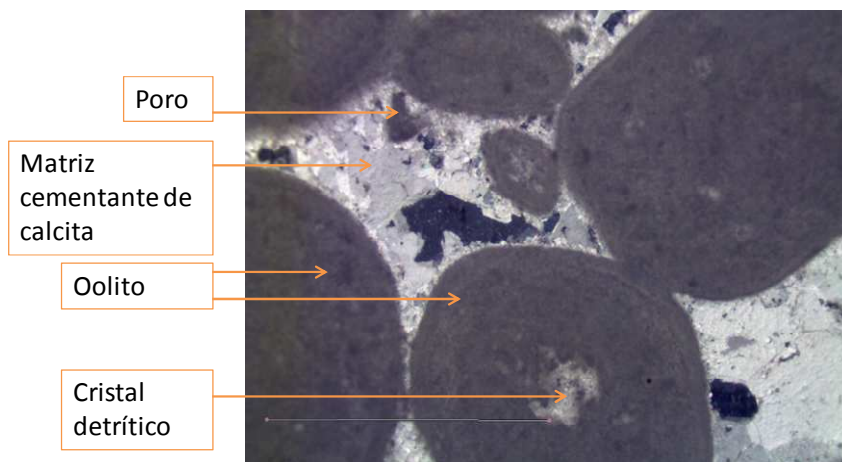


Figura 99 Microscopía de lámina fina del mineral calcinado habitualmente en Morón.

CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Pérdida al fuego (%)
94.82	2.03	0.38	2.46

Figura 100 FRX Cal viva de Morón.

El proceso de calcinación se ha descrito suficientemente en el apartado 2.5.1 Cales de Morón, Gordillo's.

El resultado es una cal en terrones de 3 diferentes calidades, apreciables a simple vista, en función de la zona del horno. Por un lado, los terrones que conforman la bóveda que reciben mayor temperatura, por otro las zonas del horno en contacto con revocos de barro que producen una cal de aspecto más amarillento y, por último, el resto que conforma el grueso de la hornada.

Para el presente estudio se ha considerado el tipo de cal viva mayoritario en la producción, es decir cal cálcica, si bien también se ha utilizado un óxido procedente de una zona de la cantera que presenta mayores contenidos de magnesio, al tratarse de una piedra dolomítica. Esta última la hemos denominado "Morón 2".

En lo referente a Morón 2, la DRX y la FRX de la piedra una vez calcinada (Figura 101 y 102) revelan la presencia de óxido de calcio y óxido de magnesio, éste último en una

proporción menor. También se detecta una pequeña proporción de calcita, muy probablemente procedente de restos incocidos.

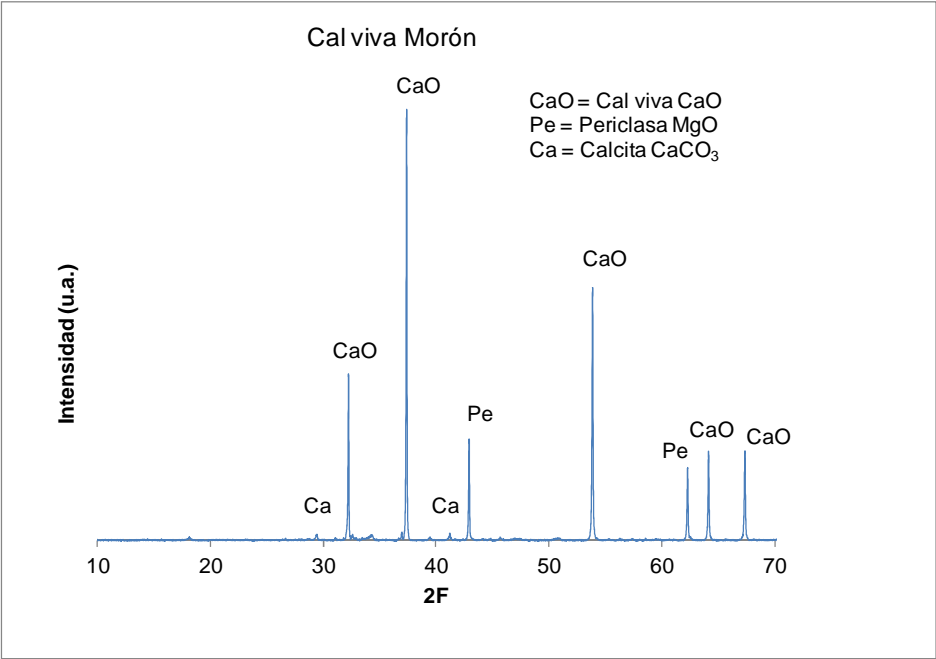


Figura 101 Difractograma correspondiente a la cal viva de Morón 2.

CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Pérdida al fuego (%)
60.02	36.45	0.25	3.10

Figura 102 FRX Cal viva de Morón 2.

Proceso de apagado en fábrica.

En la empresa Gordillo’s, de Morón de la Frontera, se apaga la cal siguiendo dos procedimientos.

Por un lado producen una cal apagada en polvo consecuencia de la hidratación al aire de la cal en terrones (Figura 103).



Figura 103 Apagado al aire en Gordillo's.

Por otro, apagan en balsa metálica con agitación. Como puede observarse en la Figura 104, el apagado se realiza por fusión añadiendo al conjunto de toda el agua necesaria, a temperatura ambiente, todo el conjunto de la cal en terrones, también atemperada con el ambiente. La balsa está dotada de un agitador mecánico que facilita la homogeneidad del apagado. A lo largo del proceso se produce un lento incremento de temperatura sin llegar a la ebullición.

Este procedimiento proporciona una cal en pasta de gran prestigio en el sector profesional, atribuible al conjunto del proceso de fabricación y a las materias primas.



Figura 104 Balsa de apagado de Gordillo's.

Apagado de la cal en laboratorio

Dado que no se dispone de datos cuantitativos de temperaturas y proporciones agua/cal en el proceso de apagado de fábrica, se decidió estudiar los efectos de la cantidad de agua utilizada en el apagado y la temperatura conseguida en laboratorio. Para ello se escogió la muestra "Morón 2" dado que tiene ciertos parecidos composicionales con la de Zone. Por otro lado, ya existe información publicada referente a la cal de Morón de Gordillo's en los trabajos de Ruiz-Agudo et al. (56).

En el procedimiento de ensayo seguido se parte de triturar y tamizar por debajo de 100 μm , los terrones de cal viva. Posteriormente se mezclan con agua a tiempos cero iguales, en proporciones de peso 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4.

Como puede observarse en la Figura 105, se preparan 2 series de las cuatro dosificaciones en 8 vasos aislados térmicamente, con la cantidad de cal viva correspondiente, a los que se añade súbitamente la misma cantidad de agua.

Los apagados se realizan en pequeños recipientes (vasos) de plástico situados en el interior de un contenedor mayor realizado con poliestireno extruido, destinado a minimizar las pérdidas de calor laterales y inferiores. Los vasos de apagado no se tapan.

Mediante termopares tipo K conectados a un dispositivo de almacenamiento de datos se miden y registran las temperaturas generadas (Figura 106).

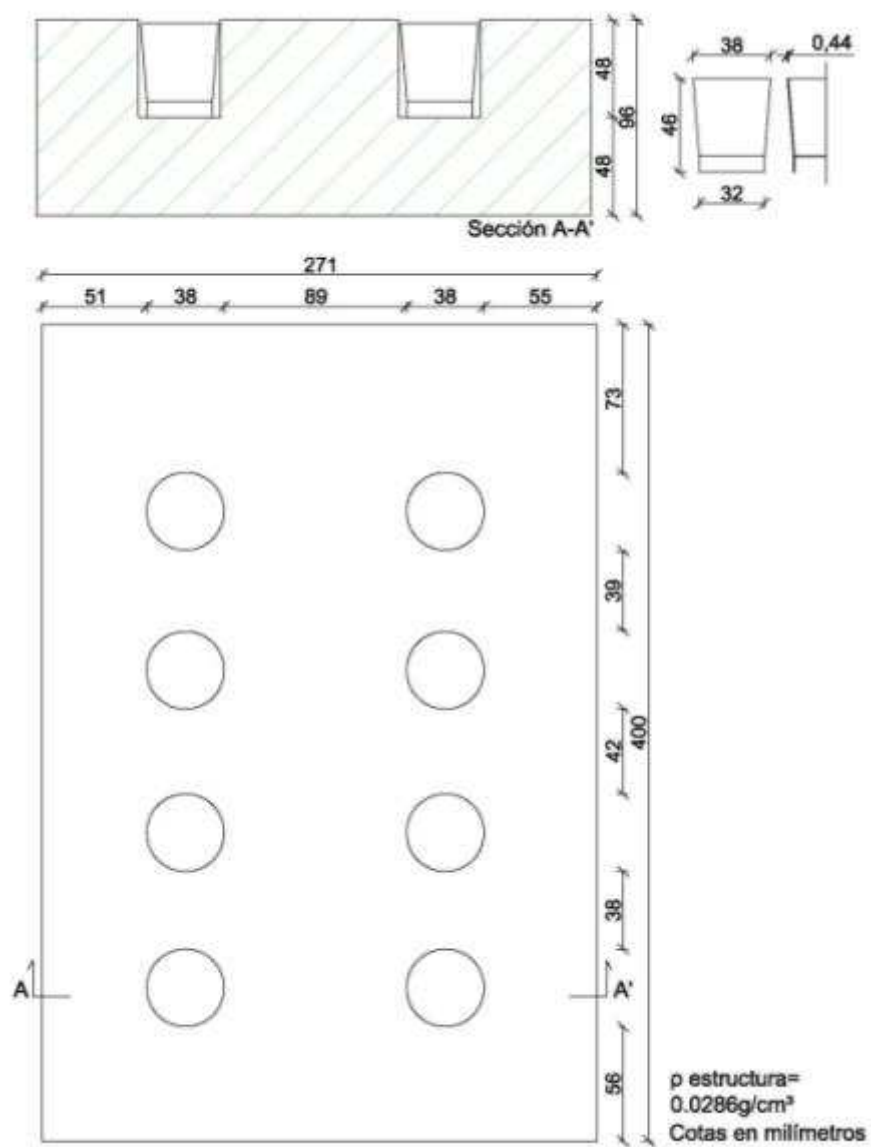
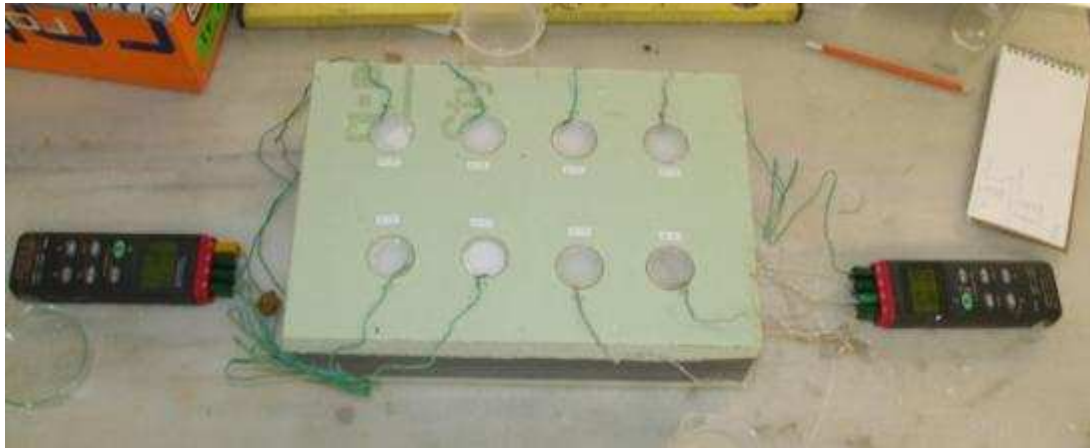


Figura 105 Apagado de cal en laboratorio con diferentes relaciones agua/cal y medida continua de temperaturas.

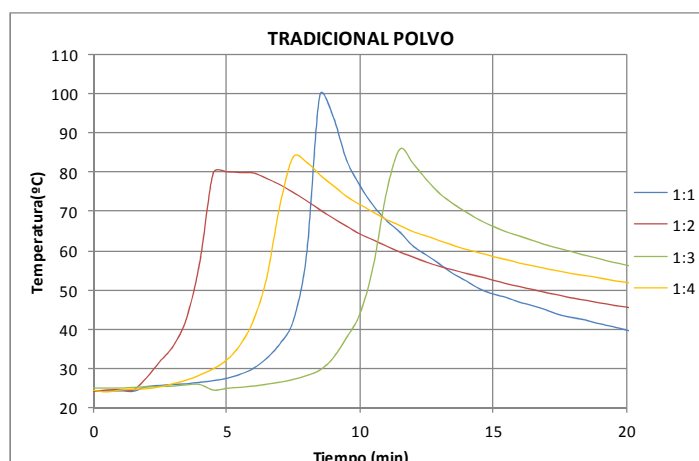


Figura 106 Graficos temperatura tiempo correspondientes a los apagados en laboratorio de la cal de Morón 2.

Tal como se observa en el gráfico, la muestra con un pico exotérmico mayor es la realizada con la relación cal:agua mayor, aunque no se observa una correlación directa con el resto de dosificaciones.

La muestra 1:1 llega a ebullición lo que genera cal en polvo. La meseta observada en la Figura 106 corresponde a un ligero amasado producido por la fijación del propio termopar en la muestra 1:2.

La dispersión de resultados de reactividad se debe a la propia falta de homogeneidad de la cocción en el sistema tradicional. La cinética de la reacción viene fuertemente influenciada por la temperatura, mientras que el incremento de temperatura desencadenante de la propia reacción depende de la probabilidad de encontrar algunas partículas (en la muestra de cal viva triturada y tamizada) más reactivas como consecuencia de la cocción.

Las muestras así apagadas se tapan herméticamente, impidiendo su carbonatación. Todas las muestras quedan con suficiente agua superficial, excepto la 1:1 que queda en formato polvo.

Posteriormente se determina el tamaño de partícula con láser, por vía húmeda con los siguientes parámetros:

Agitación del agua a 2500 rpm. Adición de la cal. Aplicación de ultrasonidos durante 2 minutos a intensidad máxima del Mastersizer 2000 de la casa Malvern Instruments.

Los resultados se muestran en la Figura 107.

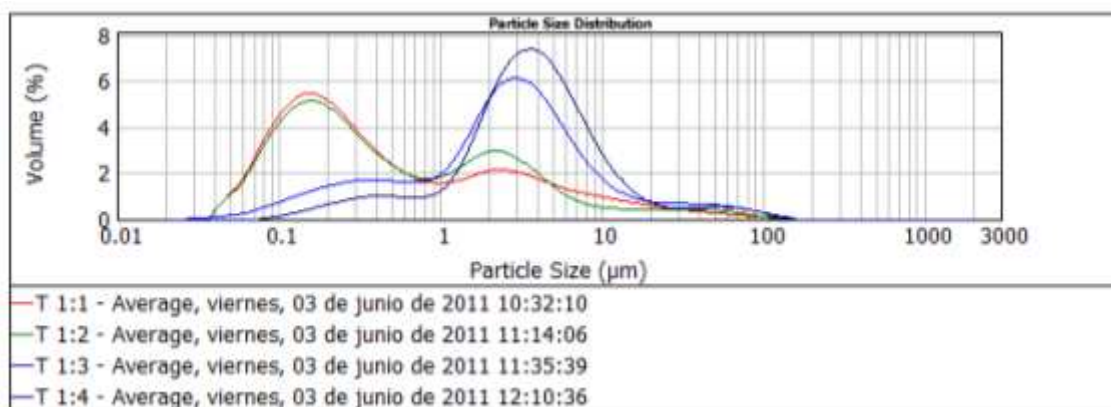


Figura 107 Resultados de la distribución de tamaños de partículas de las distintas muestras de Cal de Morón 2 apagadas con diferentes proporciones de agua.

Las muestras 1:1 y 1:2 presentan una distribución granulométrica bimodal. Las dos modas se sitúan entre 0,1 - 0,2 μm y 2 - 3 μm . La primera moda es la más representativa en las dos muestras. Pero se ha de tener en cuenta que, comparativamente, la muestra 1:1 presenta un mayor porcentaje de partículas de la primera moda, mientras que la muestra 1:2 tiene más porcentaje de partículas que la muestra 1:1 en la segunda moda.

Las muestras 1:3 i 1:4 presentan una distribución granulométrica unimodal, con una moda entre 3 y 4 μm . De forma similar a lo que sucede con las muestras anteriores, la muestra 1:3 presenta un tamaño de partículas menor (3 μm) que la muestra 1:4 (4 μm).

La difracción de rayos X (Figura 108) de las cuatro dosificaciones revela que tanto el óxido de calcio como el óxido de magnesio se han hidratado. También se aprecia algún pico de baja intensidad que corresponde a carbonato cálcico.

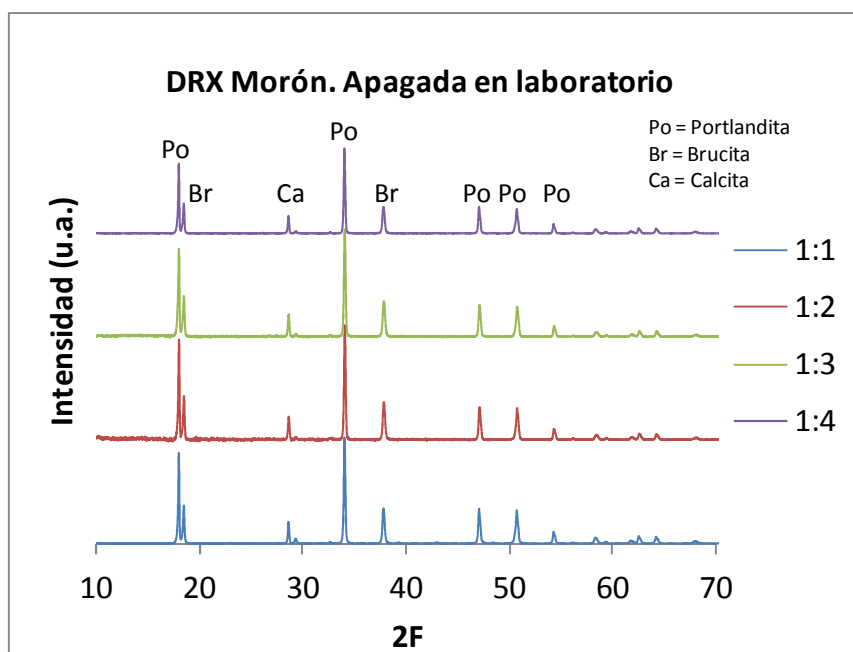


Figura 108 DRX de los productos hidratados en laboratorio de Cal de Morón 2.

5.1.2.4 Apagados realizados por Unicmall en Mallorca (España)

Como ya se ha expuesto (2.5 *Fabricación e industria*), se trata de la única empresa productora de cal de la isla de Mallorca.

Materiales utilizados.

La empresa Unicmall actualmente no calcina mineral sino que adquiere la cal viva de otras empresas de la península y la apaga en sus instalaciones. En el caso de los resultados que se presentan a continuación se partió del óxido de cal que fabrica Cales de Pachs.

Proceso de apagado continuo (Unicmall 1)

El método de apagado continuo seguido por esta industria se basa en la alimentación en continuo de agua y cal viva en terrones, de tamaño 10/40 mm, a un mezclador mecanizado con un sinfín (*fonedor*). Ambos materiales se encuentran a temperatura ambiente y se controla la reacción regulando el paso de agua y de óxido a partir de la apreciación de un operario experto.

Del mezclador se pasa, a través de un tamiz vibrante de luz de malla 200 μm , a una balsa (*batidor*) donde se completa la reacción. La balsa *batidor* dispone también de un mecanismo sinfín que produce el movimiento de la pasta. El *batidor* tarda aproximadamente 1,5 horas en llegar a su cota superior donde permanece una hora más hasta su traslado, mediante bombeo, a la balsa de envejecimiento, donde previamente se establece un segundo proceso de tamizado vibrante de 200 μm de luz de malla. (Figura 109 y 110)

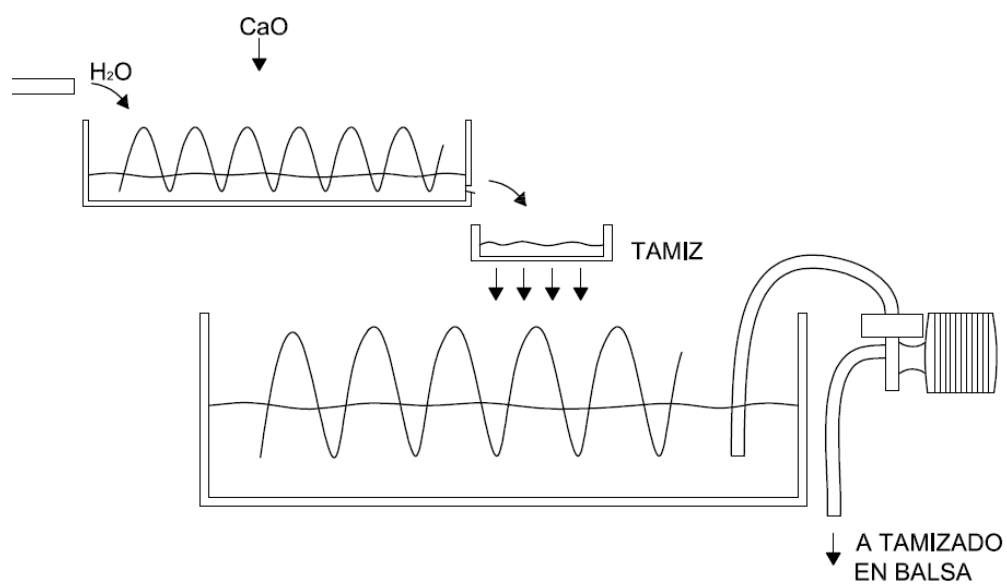


Figura 109 Esquema del proceso de apagado continuo seguido en Unicmall.



A



B



C



D



E

F

Figura 110 Diferentes visiones del proceso de apagado Unicmall 1. A) *fonedor*, B) tamizado del *fonedor* al *batidor*, C) y D) *batidor* y bomba, E) transporte por bombeo, tamizado y vertido final en la balsa de envejecimiento F) vista aérea de las balsas de envejecimiento.

Proceso de apagado discontinuo (Unicmall 2)

El segundo método, seguido eventualmente en la fábrica, se basa en un proceso discontinuo de apagado utilizando recipiente mezclador, ayudado por la rotación del fluido generada por un motor eléctrico (Figura 111 A).

El llenado del mezclador se realiza en 5 etapas de 54 litros de agua y 16 kg de cal viva cada una, manteniendo el agitador en rotación. La dosificación de agua se mide en volumen (3 cubos de 18 litros de capacidad) y la cal en terrones, de tamaño 10/40 mm, se controla también en volumen (un cubo equivale a 16 kg de cal viva). Una vez lleno el mezclador se mantiene en agitación durante 15 minutos hasta el traslado a la balsa de envejecimiento donde previamente se establece un proceso de tamizado vibrante de 200 μm de luz de malla (Figura 111 B).



A



B

Figura 111 Diferentes visiones del proceso de apagado Unicmall 2. A) mezclador, B) transporte del mezclador cargado, tamizado y vertido final en la balsa de envejecimiento.

Proceso de apagado discontinuo (Unicmall 3 y 4)

A petición nuestra se realizan dos apagados más siguiendo básicamente el proceso descrito Unicmall 2:

El primero, que hemos denominado Unicmall 3, parte de verter toda el agua inicialmente (270 litros) y seguidamente los 80 kg de cal viva.

El segundo, Unicmall 4, que repite el proceso seguido en Unicmall 2 pero en una proporción en volumen de 2 de agua (36 litros) por uno de cal (16 kg), también en 5 etapas. Finalmente se añade el agua suficiente para obtener la dosificación de los otros métodos.

El resto del proceso es igual que en Unicmall 2 (tamizado y vertido a balsa de envejecimiento).

Resultados y análisis

Evolución de las temperaturas durante los apagados de la cal

Para la medición de las temperaturas alcanzadas en el apagado se ha utilizado una cámara de termovisión y un conjunto de sondas termopares tipo K, descritos anteriormente en 7.1.2.2.4.

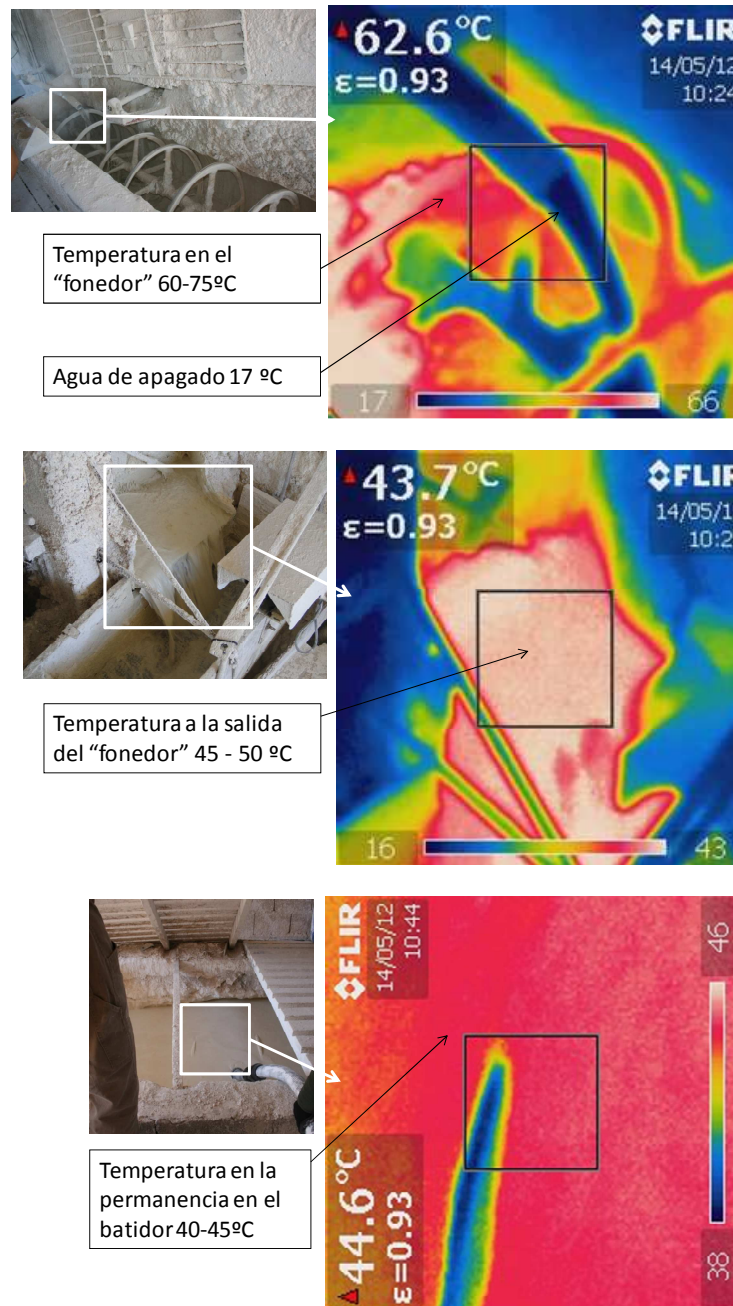
Unicmall 1

La temperatura de suministro del óxido es la propia de su equilibrio térmico con el ambiente mientras la temperatura del agua es de unos 17 °C.

La temperatura en el *fonedor* alcanza valores máximos en el intervalo de 60 a 75 °C.

Una vez se detiene el suministro de óxido al *fonedor*, se sigue suministrando agua para la limpieza del mismo lo que conlleva un descenso de la temperatura de salida del *fonedor* de 5 °C, pasando de unos 50 °C a unos 45 °C.

En el *batidor* se produce una estratificación de temperaturas con una temperatura superficial de unos 45 a 50 °C en función de la aplicación o no de agitación, la cual se produce a discreción del operario.



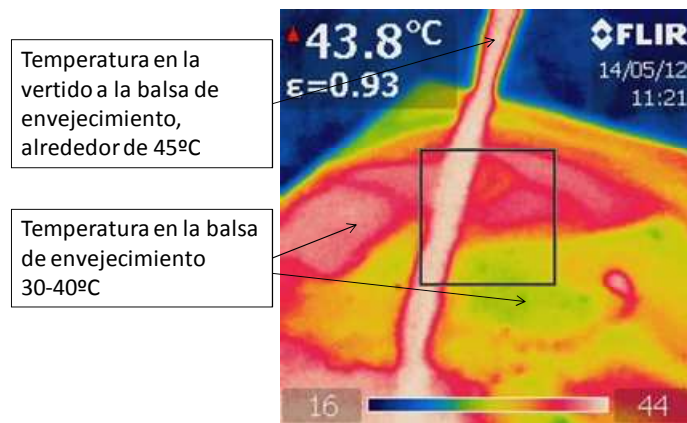


Figura 112 Temperaturas medidas en diferentes etapas del proceso de apagado "Unicmall 1"

Unicmall 2

El régimen de temperaturas observado se puede resumir en cinco rampas crecientes y decrecientes, correspondientes a las cinco etapas de añadir agua y óxido.

En la primera etapa la temperatura asciende hasta los 70 °C.

Para cada una de las etapas siguientes se produce un primer descenso de la temperatura hasta unos 60 °C como consecuencia de la adición de agua (18-20°C) para posteriormente producirse un incremento hasta unos máximos alrededor de 85 °C.

Las lecturas con cámara de termovisión permiten observar claramente la estratificación de temperaturas propia del proceso (Figura 113). La cuantificación de temperaturas es más compleja dado que la cámara estaba ajustada para la lectura directa de la cal.

Al cabo de unas 1,5 horas se procede a un reamasado y su traslado a la balsa. En ese momento se toman las muestras para su caracterización.

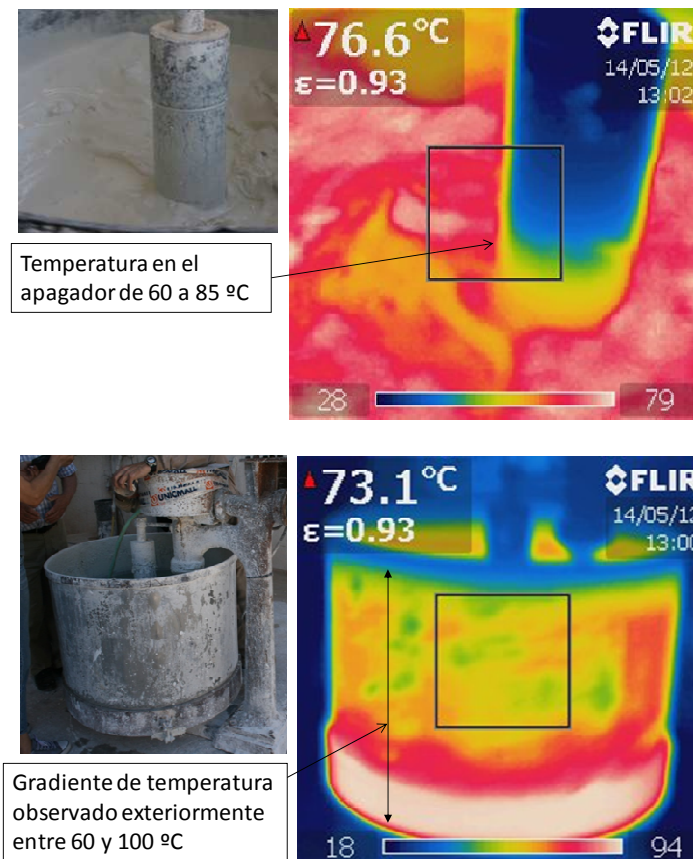


Figura 113 Temperaturas medidas en diferentes etapas del proceso de apagado "Unicmall 2"

Unicmall 3

En este caso, una vez añadidos los 15 volúmenes de agua y los correspondientes 5 volúmenes de óxido y producida la agitación, se va generando un incremento de temperatura que, medido en superficie, alcanza los 92 °C. En este momento se produce el trabado del rotor agitador como consecuencia de la viscosidad extrema de la pasta en el fondo del batidor.

A lo largo de unos 10 minutos la temperatura se mantiene a 85-86 °C, y al reiniciarse la agitación se mantiene en el rango 80–85 °C.

Posteriormente se traslada a la balsa y se toman las muestras para su caracterización.

Unicmall 4

El régimen de temperaturas observado se puede resumir en cinco rampas crecientes y decrecientes, correspondientes a las cinco etapas de añadir agua y óxido, de forma similar a Unicmall 2.

En la primera etapa la temperatura asciende hasta los 95 °C.

Para cada una de las etapas siguientes se produce un primer descenso de la temperatura hasta unos 55 °C como consecuencia de la adición de agua para posteriormente producirse un incremento hasta unos máximos de 99,5 °C, 98 °C, 93°C y 97 °C, respectivamente para cada etapa de carga-agitación.

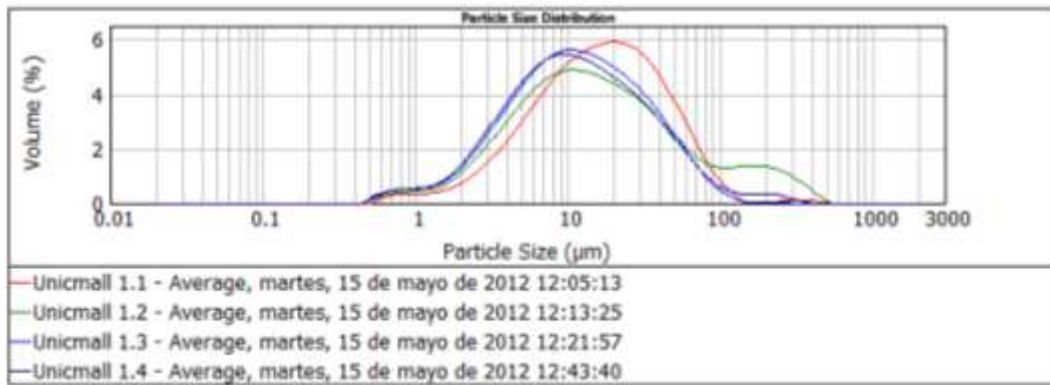
Posteriormente se añade el resto de agua hasta mantener las proporciones de los dos procedimientos anteriores observándose un descenso de temperatura hasta los 70 °C. En ese momento se traslada a la balsa y se toman las muestras para su posterior caracterización.

Caracterización de las cales

Se trata de una cal en pasta cuyo origen es un calcinado ya conocido, dado que se proviene de un óxido de Cales de Pachs, pero el hecho más relevante se centra en la distribución volumétrica del tamaño de partículas, el cual se determina con láser, por vía húmeda con los siguientes parámetros:

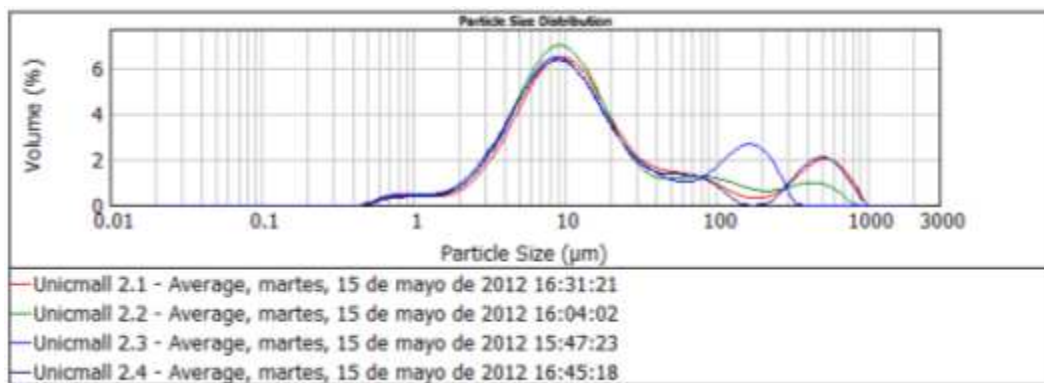
Agitación del agua a 2500 rpm. Adición de la cal. Aplicación de ultrasonidos durante 2 minutos a intensidad máxima del Mastersizer 2000 de Malvern Instruments.

Los siguientes gráficos (Figura 114, Figura 115, Figura 116 y Figura 117) muestran los resultados promedio de dos lecturas para cada una de las repeticiones realizadas en las distintas muestras, correspondientes a los cuatro sistemas de apagado.



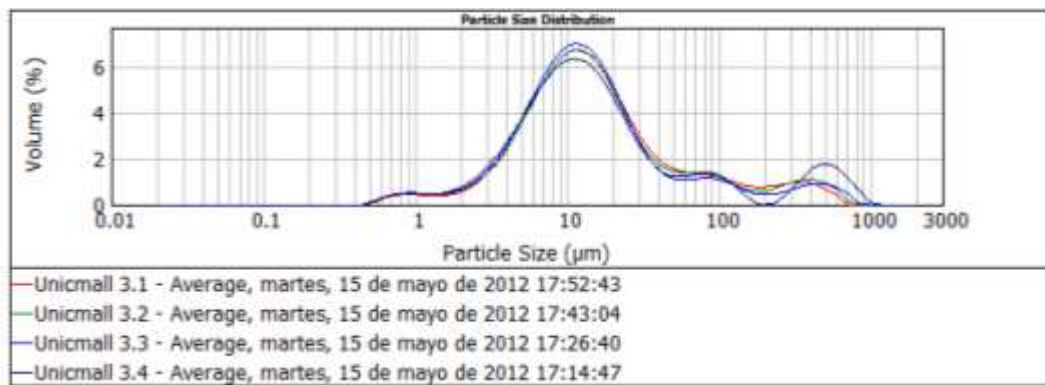
Muestra	Tamaño de corte (μm)			Intervalo moda
	< 10 %	< 50 %	< 90 %	
Unicmall 1.1	4.19	16.68	53.46	[17.4 – 23.6]
Unicmall 1.2	3.35	14.58	118.82	[9.3 – 12.6]
Unicmall 1.3	2.98	11.60	43.08	[9.3 – 12.6]
Unicmall 1.4	2.86	11.23	47.02	[8.2 – 11.1]

Figura 114 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 1.



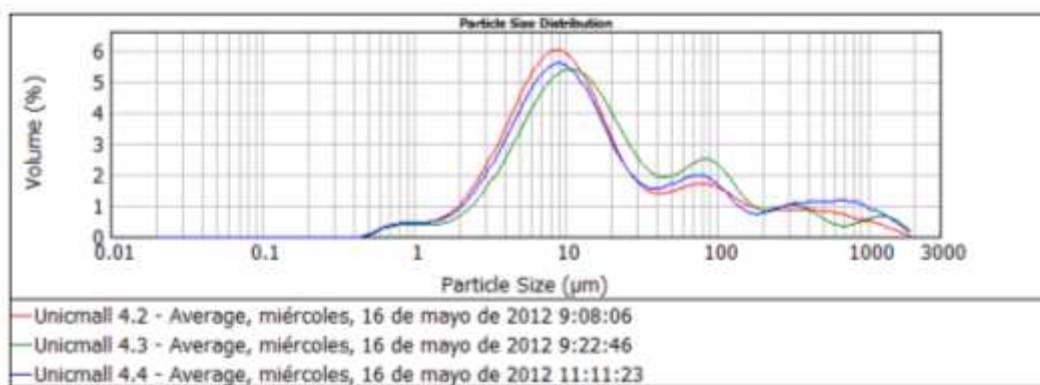
Muestra	Tamaño de corte (μm)			Intervalo moda
	< 10 %	< 50 %	< 90 %	
Unicmall 2.1	3.98	12.49	353.72	[9.5 – 12.9]
Unicmall 2.2	3.60	10.90	111.36	[9.5 – 12.9]
Unicmall 2.3	3.76	11.72	147.32	[8.0 – 10.8]
Unicmall 2.4	3.44	11.32	355.86	[8.6 – 11.7]

Figura 115 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 2.



Muestra	Tamaño de corte (μm)			Intervalo moda
	< 10 %	< 50 %	< 90 %	
Unicmall 3.1	4.25	13.52	105.12	[10.2 – 13.9]
Unicmall 3.2	4.06	13.27	110.50	[10.5 – 14.3]
Unicmall 3.3	3.94	12.60	92.41	[10.2 – 13.9]
Unicmall 3.4	3.77	13.04	258.71	[10.0 – 13.5]

Figura 116 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 3.



Muestra	Tamaño de corte (μm)			Intervalo moda
	< 10 %	< 50 %	< 90 %	
Unicmall 4.2	3.37	11.58	182.93	[8.0 – 10.8]
Unicmall 4.3	4.09	15.69	190.92	[9.7 – 13.2]
Unicmall 4.4	3.52	13.09	358.98	[8.6 – 11.7]

Figura 117 Distribución de tamaños de partículas para la muestra Unicmall 4.

Los cuatro apagados muestran una distribución básicamente unimodal con considerables aglomerados para los tamaños mayores.

La distribución correspondiente a los tamaños menores es prácticamente igual para todos los sistemas de apagado. El tamaño que determina el percentil 10 % lo podemos situar en torno a las 3 μm [2.8; 4.3].

Igualmente las modas en las distribuciones son similares para los cuatro casos, exceptuando la muestra Unicmall 1.1 que muestra una distribución ligeramente decantada a la derecha, explicable por una falta de dispersión por ultrasonido.

Los valores medios de los intervalos de clase que definen las modas correspondientes son:

Unicmall 1	Unicmall 2	Unicmall 3	Unicmall 4
10.5 ± 0.8	10.5 ± 0.9	12.1 ± 0.3	10.3 ± 1.0

Las principales diferencias entre los resultados de los distintos apagados las observamos en los tamaños mayores medidos, consecuencia de aglomerados de partículas, los cuales generan macropartículas de 1 y 2 órdenes de magnitud superior a la moda. Estas grandes partículas permanecieron como agregados aún después del proceso previo de dispersión por ultrasonidos en baño de agua en agitación descrito.

Viscosidad

Si bien los resultados de las distribuciones de los tamaños de partículas son muy relevantes, tienen especial interés, entre otros, en cómo afectan a la viscosidad de la cal en pasta, por lo que se midió la viscosidad de la muestra Unicmall 1, a los 6 meses de envejecimiento en bote de plástico conservado en laboratorio.

La metodología corresponde al Proocolo A3 (4.3.2.4 *Metodología seguida para la medida de la viscosidad*). Y los resultados se muestran en la Figura 118.

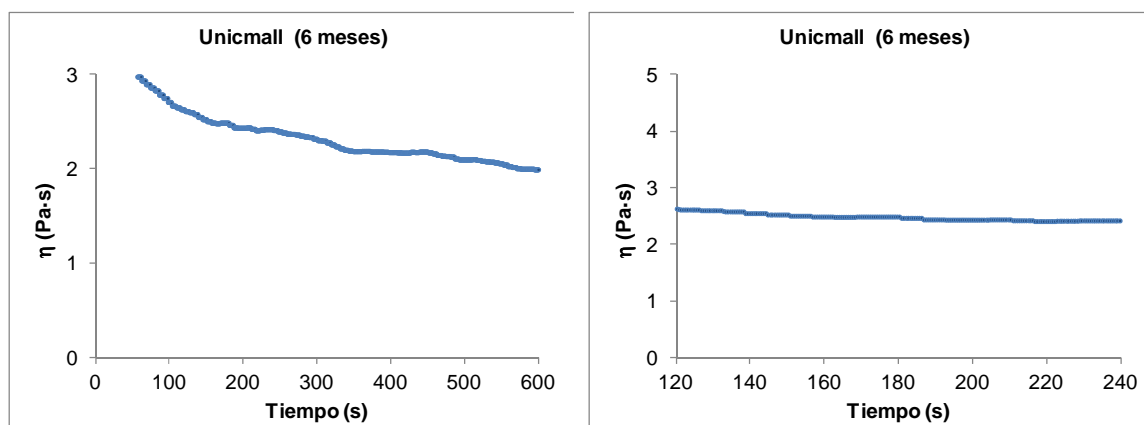


Figura 118 Resultados de la medida de la viscosidad de la muestra Unicmall 1 a la edad de 6 meses, conservada en laboratorio.

Apagados en laboratorio

A efectos comparativos se realizaron apagados en laboratorio bajo condiciones conocidas, repitiendo la experiencia realizada con la cal de Morón (ver 7.1.2.3).

Las muestras de cal viva se trituraron manualmente y se tamizaron por debajo de 1 mm. También en este caso se realizaron apagados en proporciones cal viva / agua 1:1, 1:2, 1:3, 1:4; sin agitación y se midieron las temperaturas generadas (Figura 119).



Figura 119 Apagado en laboratorio de cal de Unicmall con distintas proporciones de agua.

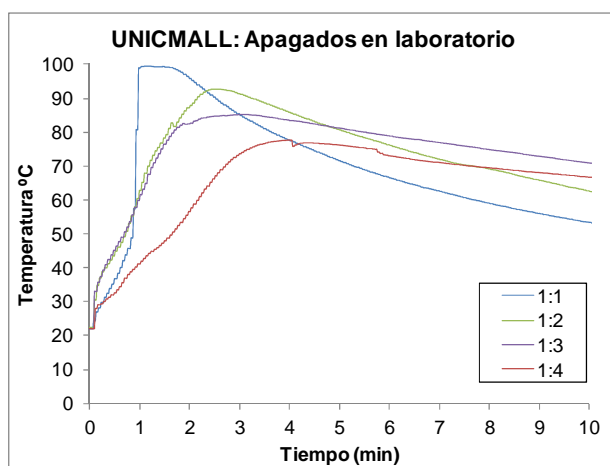
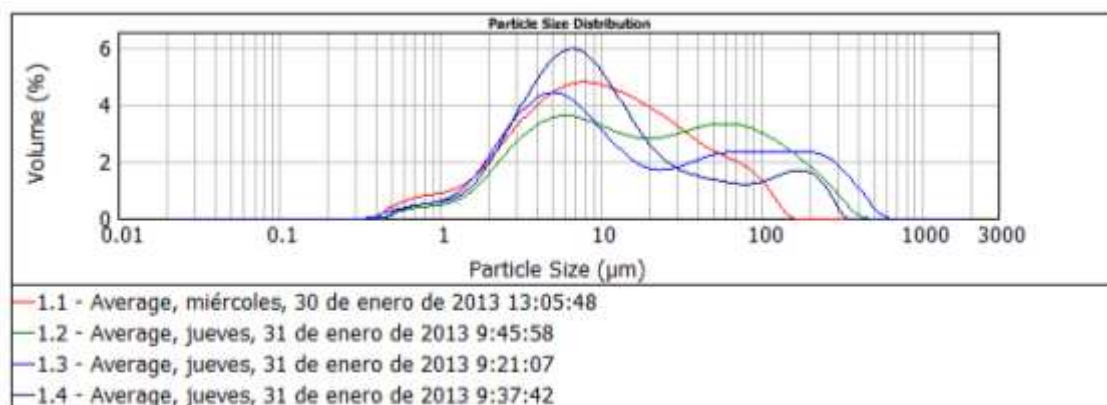


Figura 120 Gráficos de temperatura- tiempo correspondientes a los apagados en laboratorio de la cal Unicmall.

La muestra 1:1 llega a la ebullición y genera cal en polvo. El resto de proporciones cal-agua muestra una correspondencia con los máximos exotérmicos medidos.



Muestra	Tamaño de corte (μm)			Intervalo moda
	< 10 %	< 50 %	< 90 %	
Unicmall 1:1	2.12	9.90	52.77	[7.01 – 9.52]
Unicmall 1:2	2.82	18.80	138.21	[5.44 – 7.40] y [52.77 – 71.68]
Unicmall 1:3	2.33	11.69	200.32	[4.33 – 5.89] y [60 – 200]
Unicmall 1:4	2.52	8.60	102.01	[6.33 – 8.10] y [170 – 230]

Figura 121 Distribución de tamaños de partículas para las diferentes cales Unicmall apagadas en laboratorio.

Las cales apagadas provenientes de las diferentes proporciones de agua se han caracterizado a partir de la distribución de tamaño de partículas con idéntico procedimiento al seguido para la cal de Morón. Los resultados (Figura 121) muestran en general gran aglomeración de cristales formando partículas de gran tamaño. Es de destacar que la dosificación 1:1 (ebullición, cal en polvo) presenta los aglomerados en un rango inferior a las 200 μm, mientras que para los apagados con más cantidad de agua se observan distribuciones bimodales con aglomerados hasta las 400/500 μm.

Respecto de los resultados de los distintos procesos de apagado en la fábrica, no existen diferencias significativas entre los tamaños menores ni entre las modas de las distribuciones, lo que parece depender más de la génesis del óxido (tipo de piedra, tipo de cocción, temperaturas del horno, etc.) que no de las diferencias en los apagados concretos.

El proceso de apagado continuo Unicmall 1 genera menos aglomerados intensos de cristales que los sistemas discontinuos estudiados. De hecho, el proceso continuo conlleva mayor agitación en el apagado en *fonedor* y en *batidor*, un doble tamizado y un bombeo.

Refiriéndose al apagado Unicmall 2 respecto del Unicmall 1, Joan Mestre, propietario de la fábrica, dijo:

“amb aquesta apagada queda una pasta mantegosa i no cremosa com l’apagada del fonedor”²⁵.

²⁵ Con este sistema de apagar queda una pasta mantecosa y no cremosa como la apagada en el *fonedor*.

Efectivamente, los resultados de los tamaños de partícula corroboran la apreciación organoléptica.

5.1.2.5 Apagados realizados por Oriol García en Barcelona

Como se ha comentado anteriormente Oriol García es un “estucador” tradicional que prepara sus materiales en su taller de Barcelona. Esta preparación parte del apagado y envejecimiento de la cal, para pasar a la preparación de los distintos morteros (de base, de acabado, coloreados, etc.) y materiales de protección.

La balsa de apagado que utiliza es prácticamente la de la Figura 122, extraída de su libro (22), pero de mayores dimensiones en planta. Se trata de una instalación fija, de obra, en la que se produce el apagado en la parte superior y el almacenamiento y envejecimiento, en la parte inferior.

Se prepara la balsa con una cantidad de agua equivalente a tres veces y medio el peso de la cal en terrones. Va introduciendo la cal viva en terrones de una granulometría 20/40 mm, a capazos repartidos alrededor del perímetro de la balsa a lo largo de 1,5 horas, lo que produce una hidratación muy escalonada de la carga (Figura 123) y, por tanto, no se produce una importante elevación de la temperatura. Una vez introducida toda la cal se remueve manualmente con unas grandes palas. Una vez homogeneizada se tamiza por gravedad separando las partes incocidas y los posibles grappiers (Figura 124) y se deja sedimentar en una de las cavas inferiores (Figura 125). Al día siguiente, el exceso de agua se bombea nuevamente a la balsa donde se producirá un nuevo apagado. En todo el proceso no hay aportación de calor exterior al agua.

La cal en pasta envejecerá en esta cava durante unos meses (mínimo 6 a 9), mientras se consume la cal de la cava vecina.

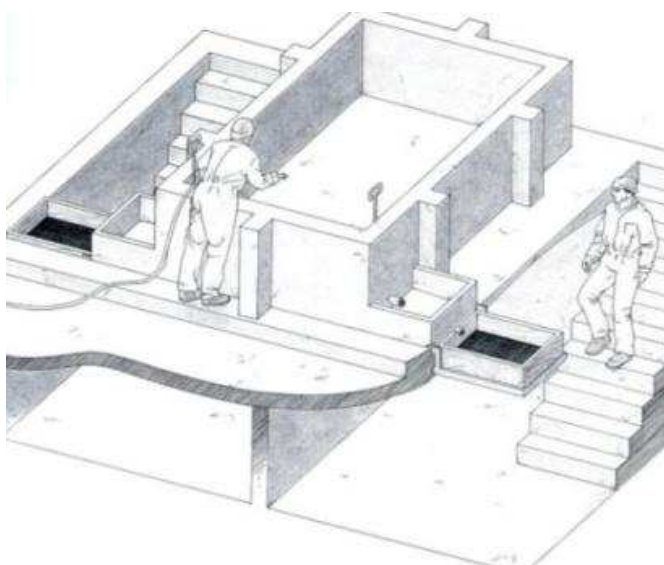


Figura 122 Figura extraída de “La guía práctica de la cal y el estuco” (38), coincidente básicamente con la balsa de apagado que Oriol García tiene en su taller de Barcelona.



Figura 123 Aportación de la cal viva a la balsa llena de agua de capazo en capazo.



Figura 124 Tamizado de los grapiers y los crudos.



Figura 125 Vista de la zona inferior a la balsa donde se produce el envejecimiento.

La producción de cal en pasta depende de la demanda de trabajos profesionales. En algunos casos, los restos de cal se almacenan en bidones de plástico para su posible uso futuro. Este hecho ha posibilitado disponer de cales en pasta provenientes de distintos apagados y con edades de envejecimiento diferentes.

Temperaturas durante el apagado de la cal

Se han realizado lecturas de la temperatura mediante termopares tipo K conectados a un dispositivo de almacenamiento de datos y mediante un termómetro de infrarrojos a distancia TPT 64P, FSI Company.

La temperatura superficial del agua de la balsa de apagado no subió de forma significativa ($< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) en ninguno de los dos días en los que se realizaron lecturas.

Las temperaturas iniciales del agua estacionada fueron de 23 y $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Hay que mencionar que se trata de agua proveniente de la sedimentación del apagado de tongadas pretéritas y que se realizaron las medidas en el mes de junio.

Los resultados de las lecturas en puntos interiores de la balsa muestran mucha variedad en función de donde se sitúan los termopares respecto de las zonas donde se está produciendo la reacción de apagado. Las temperaturas pueden llegar a alcanzar los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de forma puntual sin aparecer en superficie síntomas de ebullición. Como muestra de esta disparidad la Figura 126 donde se aprecian los resultados medidos con dos termopares “próximos” situados en distintos puntos (\blacktriangle).

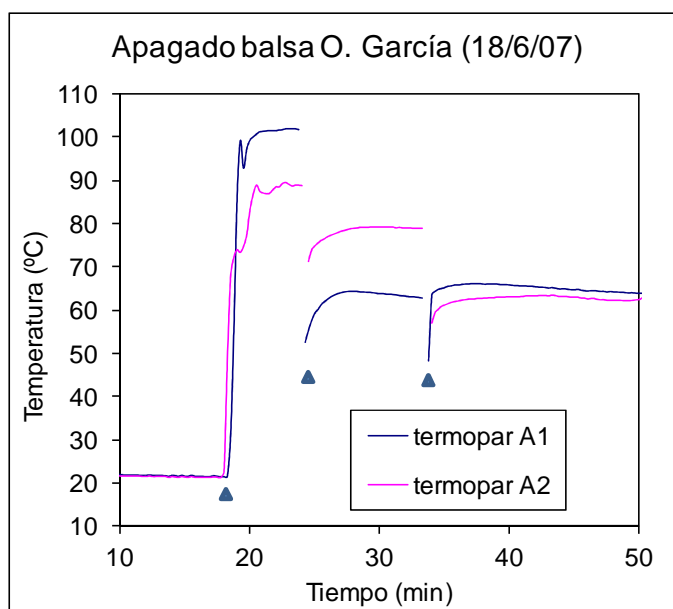


Figura 126 Medidas de temperaturas en el apagado 18/6/07 O. García.

Otra característica remarcable de este procedimiento es el hecho que no se produce agitación hasta que no se ha añadido la totalidad de la cal viva a la balsa, proceso que dura entre 1,5 y 2 horas. Por tanto, la distribución de temperaturas es poco

homogénea, se producen picos térmicos muy considerables y no se produce enfriamiento rápido (Figura 127), lo cual ha de facilitar la formación de aglomeraciones de partículas.

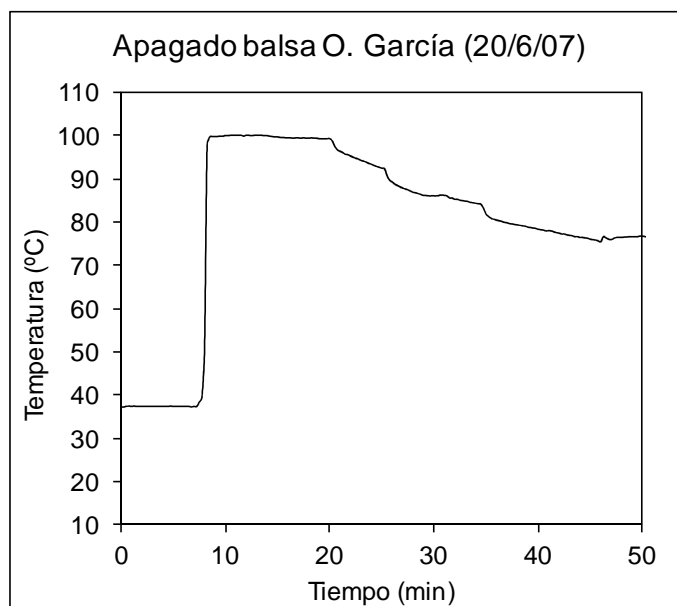


Figura 127 Medidas de temperatura en un punto fijo, en el apagado 20/6/07 O. García.

No se tomaron muestras recién apagada la cal con lo que sólo se dispone de cales apagadas por este procedimiento, procedentes de distintos óxidos, una vez envejecidas. La Figura 128 muestra la distribución de tamaños de partículas de distintas cales envejecidas a distintas edades. A pesar de los diferentes orígenes y de las diferentes edades las cuatro muestras denotan modas similares, entre 10 y 13 μm , y presencia de aglomerados superiores a 40 μm que no han podido ser redispersados en el proceso estándar del ensayo.

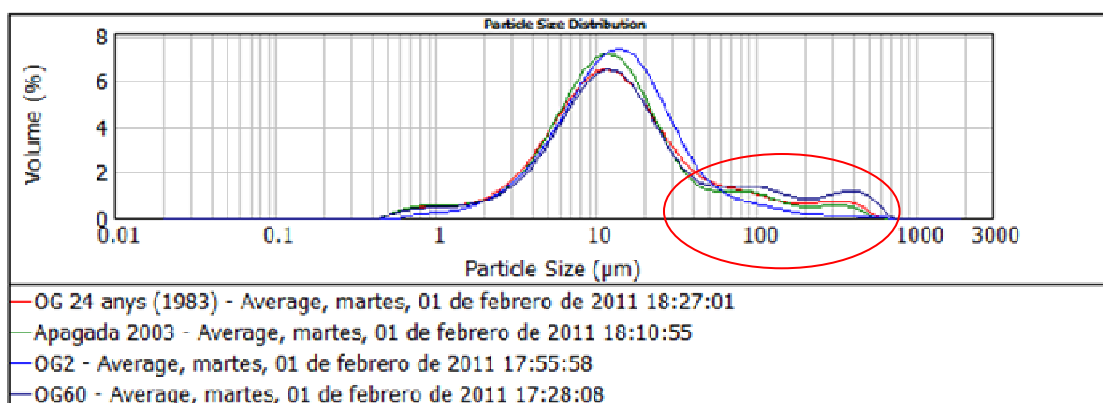


Figura 128 Resultados de la distribución de tamaños de partículas de distintas muestras de cal de O. García apagadas en su balsa.

5.1.2.6 Discusión de resultados de los diferentes apagados.

Como se ha constatado en los cuatro casos estudiados la aparentemente simple operación de hidratar la cal viva para formar cal apagada permite diferentes variantes procedimentales al margen de los modernos hidratadores industriales de producción continua.

Buscando puntos en común podemos destacar la proporción de cal viva/agua que en los cuatro casos (excepto Z4) se sitúa en el intervalo $1/3$ a $1/4$. Sin embargo la manera de añadir la cal al agua (o el agua a la cal), juntamente con la propia reactividad de cada cal viva, proporciona temperaturas de hidratación distintas.

Asimismo cada proceso conlleva un sistema de agitación en la reacción distinto lo que permite difundir con mayor o menor rapidez la temperatura generada y homogeneizar la concentración de la dispersión.

Analizando los dos casos de cales dolomíticas destacamos:

Zone

Los tres productos de cal hidratada estudiados, producidos a partir de una misma cal dolomítica viva en terrones, y apagada mediante diferentes sistemas tradicionales, han mostrado algunas diferencias significativas.

En cuanto a la composición, el apagado por inmersión (Z4) no da lugar a la hidratación del óxido de magnesio a causa de la falta de agua inicial y de la menor cinética de hidratación de la periclase frente a la cal viva. Mientras en los otros apagados (Z2 y Z3) no se han detectado diferencias de composición en las cales en pasta y en ningún caso se detecta óxido de magnesio.

El apagado tradicional en balsa (Z2) ha dado lugar a cales con menores tamaños de partícula y con mayores viscosidades a tres meses de envejecimiento.

El envejecimiento en laboratorio, por tres años, de la cal en pasta ha dado lugar a aumentos muy significativos de viscosidad, lo cual corrobora el interés tradicional por el envejecimiento de las cales en pasta y en mayor medida de las cales dolomíticas en pasta.

Se confirma que la cantidad de agua y la temperatura producida en el apagado afectan a la distribución de tamaños de las partículas que se generan, si bien a partir de relaciones cal/agua de $1/3$ las diferencias se minimizan.

Morón 2

Para este caso se dispone de los resultados de los apagados en laboratorio,

Para todas las proporciones cal/agua no se ha observado la presencia de óxido de magnesio en los productos hidratados, ni siquiera en las proporciones de agua más bajas.

Resulta muy relevante el tamaño nanométrico de las partículas generadas a partir de los apagados con menor cantidad de agua. Partiendo de partículas de cal viva de tamaño inferior a 100 μm , a medida que se utiliza más agua para apagar la cal, entre los intervalos estudiados, el tamaño de las partículas de Ca(OH)_2 se hace más grande, pero siguen siendo cales de tamaños de partículas muy pequeños.

Comparando ambos casos (Zone vs Morón 2), ambas cales dolomíticas, se muestra como muy relevante la agitación y la propia naturaleza de la cal viva en el resultado de la distribución de tamaños de partículas.

En los casos de **Unicmall** y **Oriol Garcia**, ambas cales cálcicas provenientes de la misma cal viva, el planteamiento es claramente distinto. Así, mientras el primero produce el apagado de forma continua (Unicmall 1) con temperaturas considerables que llegan a los 75 °C y mucha agitación para posteriormente madurar el apagado en el *batidor* a una temperatura alrededor de los 45 °C, el segundo procede por adición muy lenta de la cal viva a la totalidad del agua prevista sin agitación hasta el final del proceso lo que genera núcleos calientes (hasta cercanos a los 100 °C). No se dispone de resultados de granulometrías de cales de O.G. recién apagadas por lo que los resultados expuestos corresponden a diferentes antigüedades y, por tanto, los aglomerados presentes pueden ser tanto del apagado como del envejecimiento.

Las variantes estudiadas de los apagados de Unicmall (2 a 4) presentan mayor dificultad de producción y dan resultados claramente peores que el sistema continuo, con tamaños mayores en los diferentes cuantiles, especialmente con mayor cantidad de aglomerados.

Los apagados en laboratorio de Unicmall (Pachs) se diferencian fundamentalmente en la falta de agitación, lo que provoca claramente aglomeraciones mayores, si bien se corrobora que los tamaños menores y medios de las distribuciones son similares a los determinados en los apagados en fábrica, lo que permite insistir en su dependencia del tipo de materia prima y cocción.

Asimismo los apagados (con agitación) en laboratorio de Zone respecto de los tradicionales (Balsa y Grande aqua) presentan tamaños de partículas algo menores, pero muy parecidos.

5.1.3 Observaciones con microscopía electrónica

Seguidamente se presentan y discuten los resultados correspondientes a las observaciones realizadas con microscopio electrónico de barrido SEM en algunas de las cales estudiadas.

A nivel metodológico se partió de la realización de pruebas preliminares para ajustar el procedimiento de preparación de la muestra (proceso de dispersión, de secado en diferentes atmósferas, etc.). También se realizaron observaciones con diferentes recubrimientos de las muestras y con distintos microscopios electrónicos: ESEM Quanta 200 FEI (ambiental) y SEM Jeol JSM-840 con EDAX (Figura 133), ambos de los SCTUB, el microscopio SEM Jeol JSM-840 con EDAX de la Universitat d'Alacant (Figura 129 aFigura 132) así como el microscopio SEM Jeol JSM 6400 y el Jeol JSM-7001F Field Emission SEM de la UPC (Figura 134 a Figura 153).

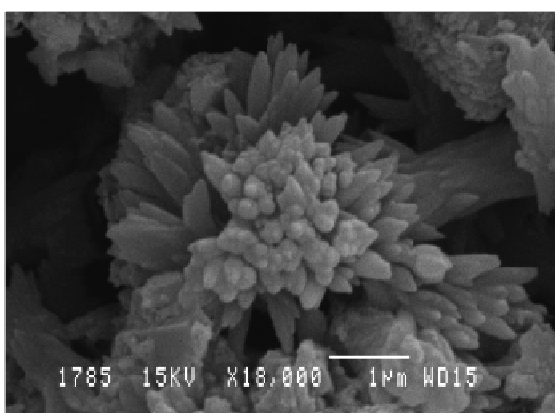


Figura 129 Muestra OG3, secada al aire. Se observan cristales de aragonito propios de la carbonatación de la muestra en el proceso de secado.

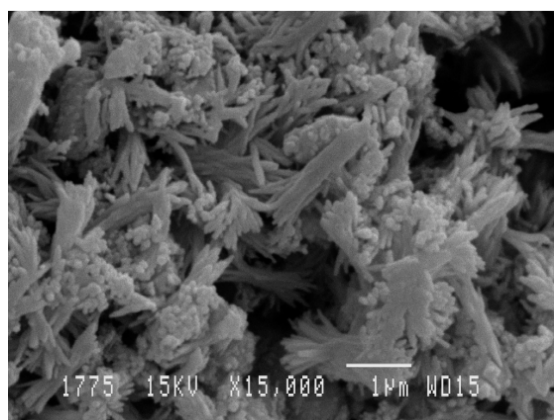


Figura 130 Muestra Sevilla, Muestra OG3, secada al aire. Se observan cristales de aragonito propios de la carbonatación de la muestra en el proceso de secado.

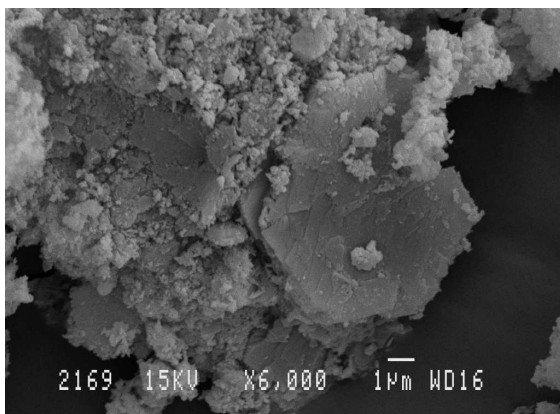


Figura 131 Muestra AKRA, secada en estufa. Se observan cristales de portlandia hexagonales junto a cristales micrométricos poco definidos.

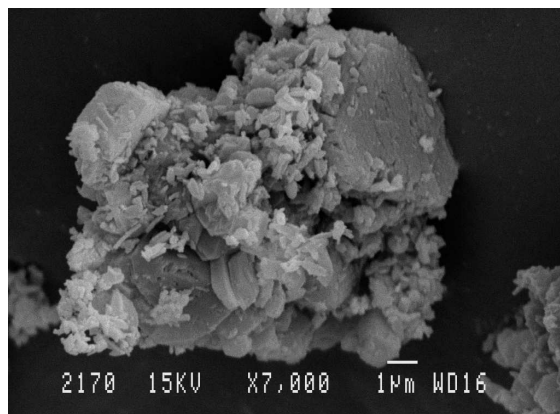


Figura 132 Muestra Sevilla, secada en estufa. Se observa un aglomerado de partículas de varias morfologías y tamaños.

Finalmente se realizó una campaña de observaciones en el microscopio, SEM Jeol JSM-840 con EDAX del SCTUB, con recubrimiento de oro. Se constató (Figura 133) que no se conseguía suficiente definición de la imagen para observar con precisión los bordes de los granos, pero si permitía distinguir los aglomerados de partículas y algunos cristales tabulares y prismáticos.

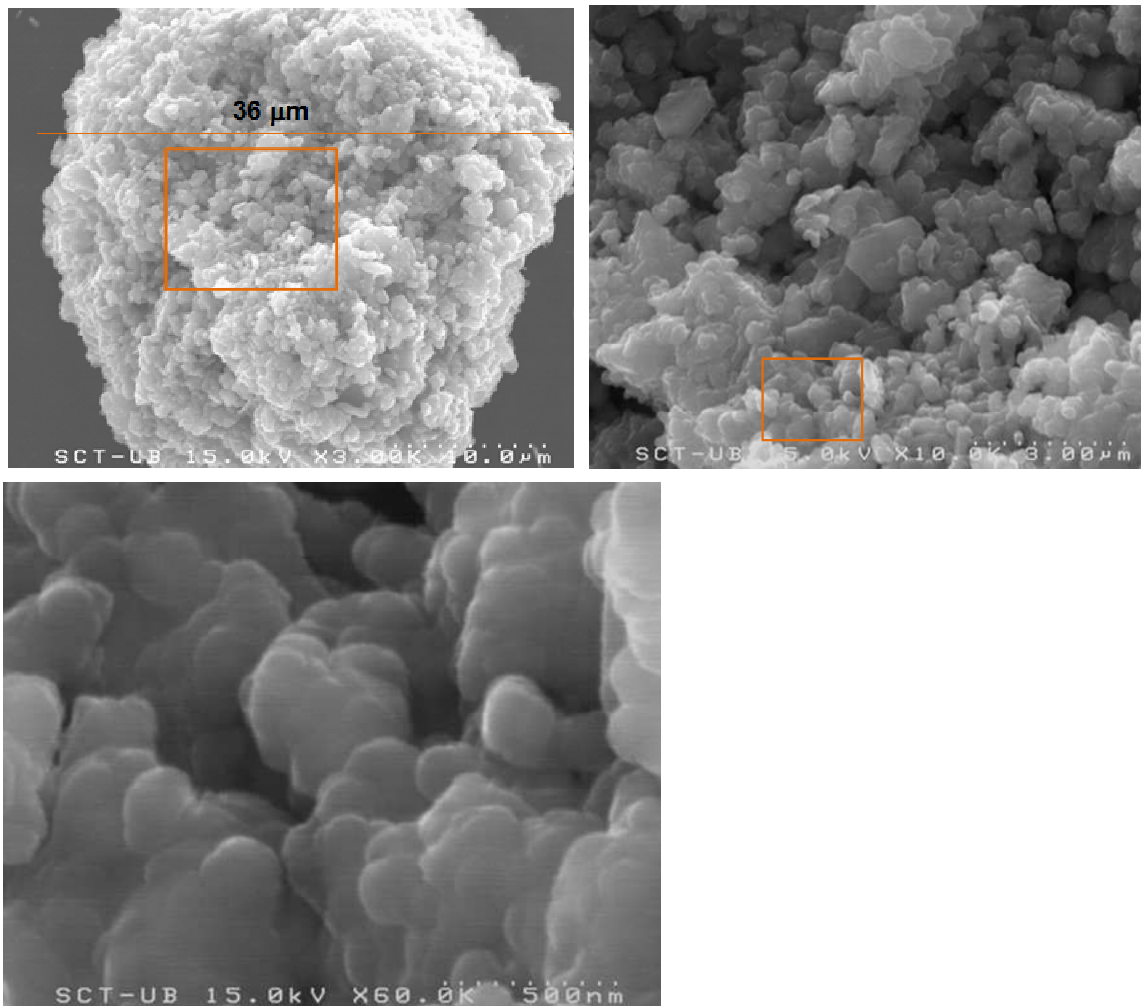


Figura 133 Microscopias correspondientes a una partícula de cal cálcica OG 24 meses, realizadas con SEM Jeol JSM-840 con EDAX del SCTUB, con recubrimiento de oro.

Recientemente, en 2013, y con mejor tecnología experimental se realizaron nuevas observaciones con microscopio electrónico Jeol JSM-7001F, Field Emission SEM de la UPC, con recubrimiento de paladio-platino. Las muestras se desecaron por sublimación. Estas observaciones han permitido acceder a imágenes de superior calidad a las observadas en las bibliografías reseñadas.

Se han escogido 4 cales en pasta añejas de diferentes orígenes (incluso geográficos: Baleares, Catalunya, Valencia y Andalucía) y una cal en polvo generada por un apagado con agua y vapor.

Unicmall 1

Muestra de cal en pasta proveniente de la empresa Unicmall descrita en el apartado 4.2.1 Cales en pasta y 5.1.2.4 Apagados realizados por Unicmall en Mallorca (España), y nombrada Unicmall 1.

La cal envejeció en balsa en la fábrica (Mallorca) durante 6 meses y posteriormente se extrajo una muestra que se conservó en bote de plástico cerrado y con contenido de agua suficiente para garantizar la conservación sin carbonatación durante 4 meses más

Se observan los diferentes hábitos de los cristales de portlandita (Figura 134), por un lado se identifican claramente cristales prismáticos y tabulares donde se pueden apreciar de forma incipiente los planos de exfoliación (Figura 135 y Figura 138) y cristales más sutiles, de hábitos lamelares con aristas bien definidas, todo ello propio de procesos breves de envejecimiento. Asimismo se perciben agrupaciones de plaquetas submicrométricas, en forma de castillo de naipes (Figura 137 y Figura 139) y aglomerados de partículas nanométricas (Figura 135).

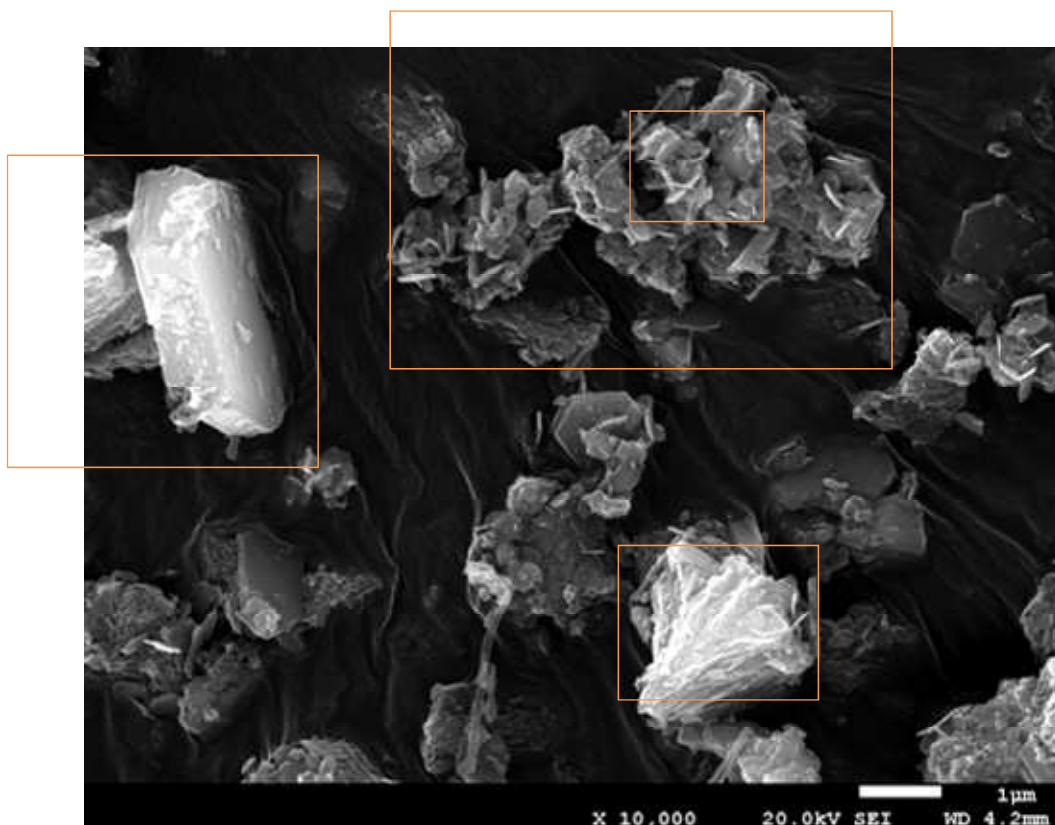


Figura 134 Visión polimórfica de la portlandita donde se observan distintos hábitos cristalinos.

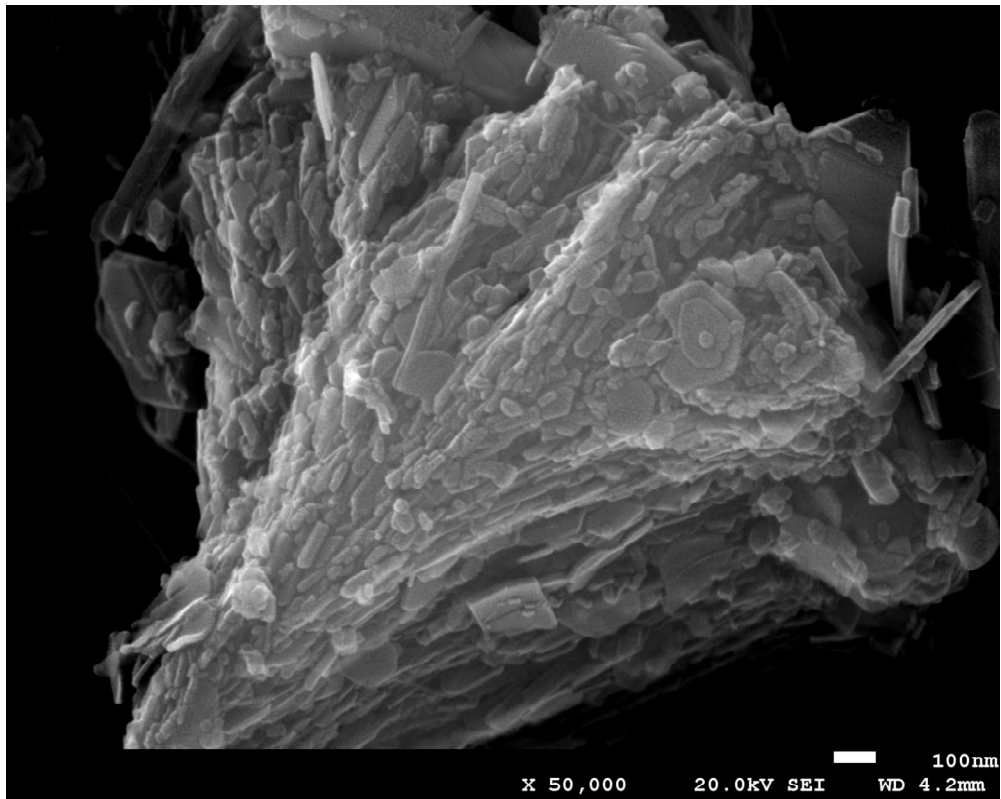


Figura 135 Grumo de plaquetas nanométricas donde también se aprecian dos cristales tabulares submicrométricos.

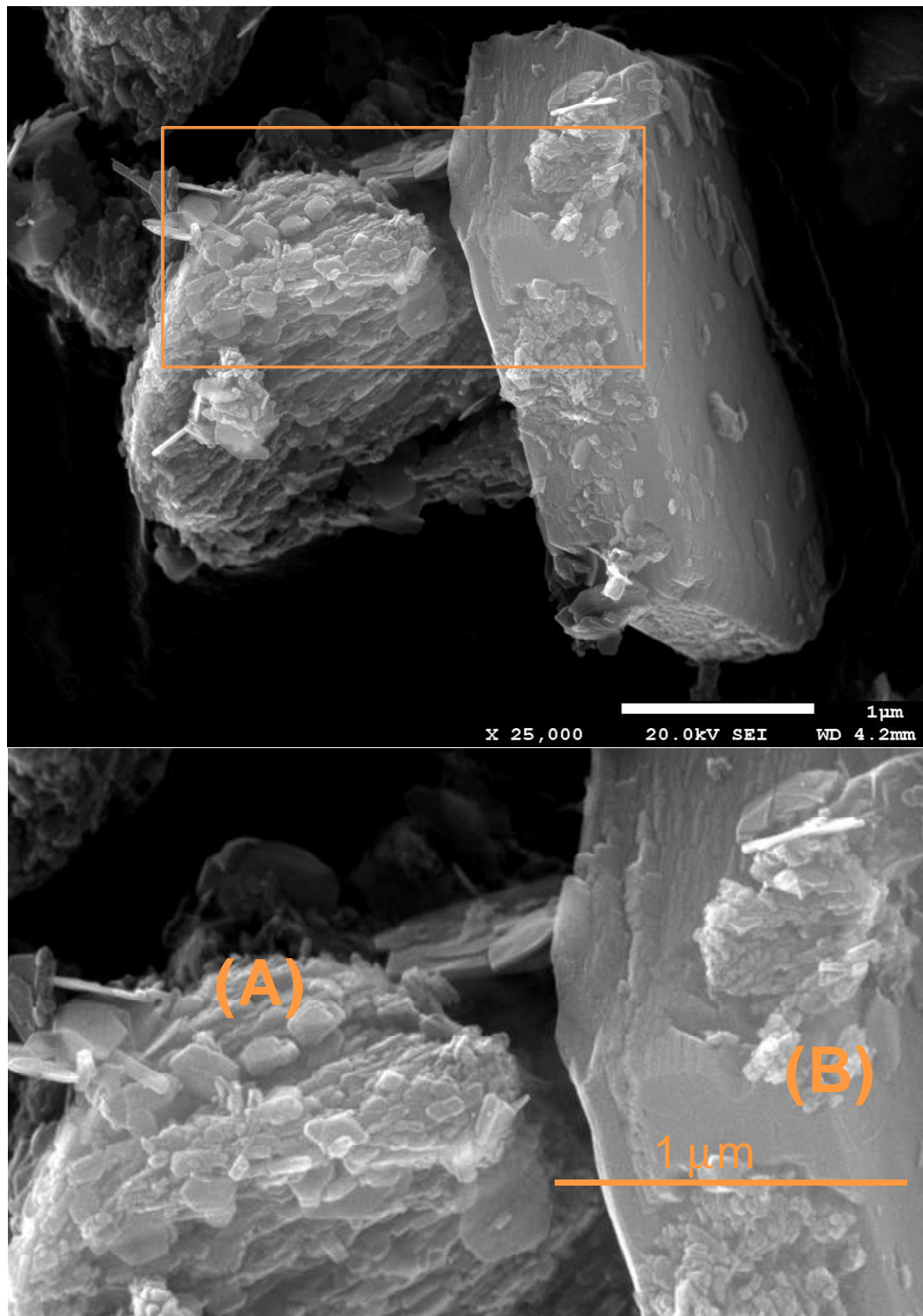


Figura 136 Aglomerado de pequeñas plaquetas y pequeños cristales tabulares o fragmentos de ellos (A), y cristal micrométrico de portlandita tabular (B), donde se pueden apreciar los planos de exfoliación.

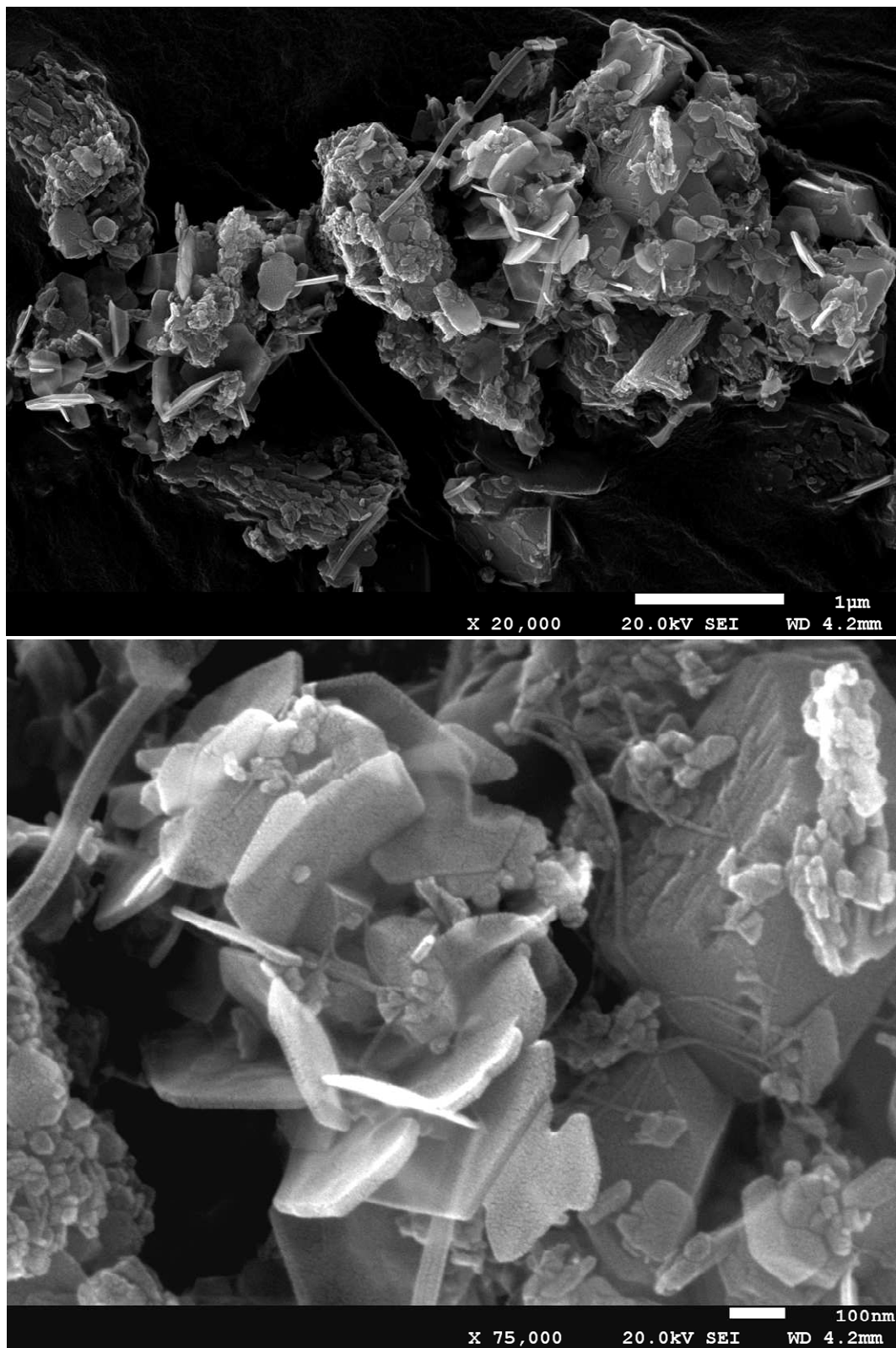


Figura 137 Plaquetas tabulares submicrométricas, apiladas en forma de castillo de naipes, y cristal prismático con planos de exfoliación muy marcados. También se observan cristales fibrosos de aragonito y partículas nanométricas de portlandita.

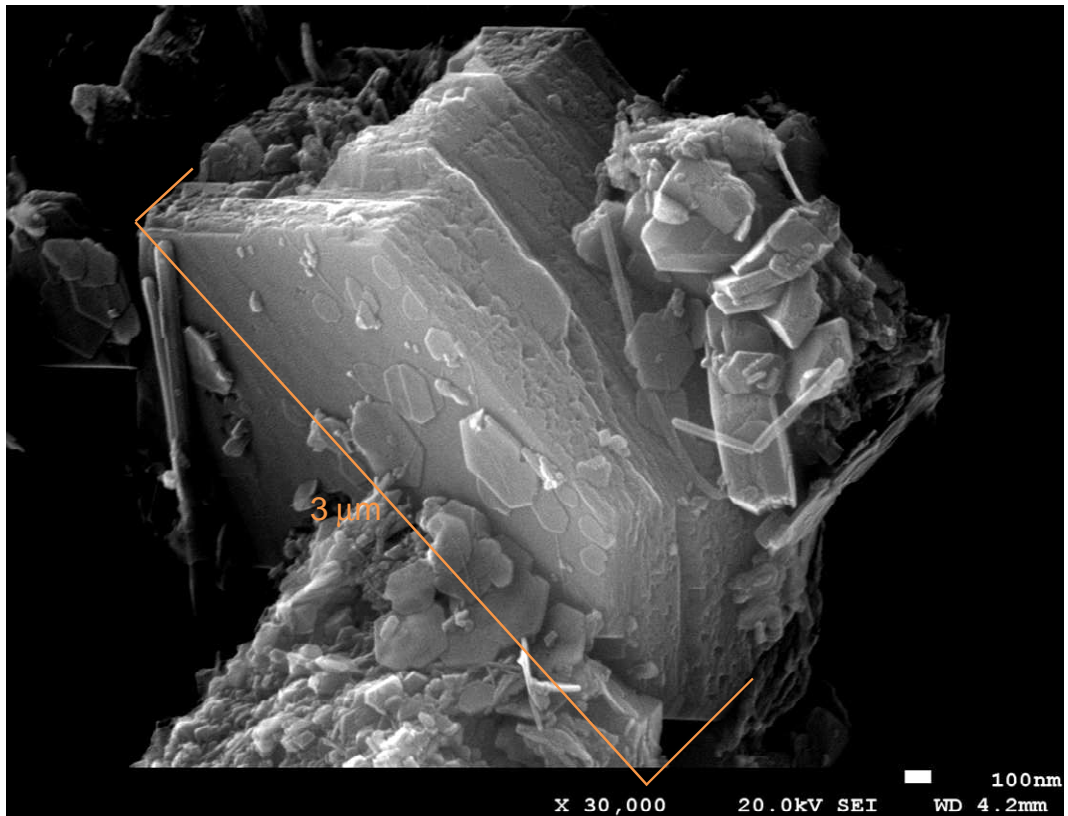


Figura 138 Cristal prismático de portlandita. Se aprecian los planos de exfoliación paralelos. Sobre la cara (001) se pueden ver pequeñas plaquetas adheridas por la misma cara, submicrométricas y también nanométricas.



Figura 139 Aglomerado de plaquetas submicrométricas dispuestas como castillo de naipes con reacción aparente entre bordes de cristales para conformar una estructura de neoformación.

OG 1 mes (+ 4 años)

Muestra de cal en pasta proveniente del apagado de una cal viva de Cales de Pachs por Oriol García, codificada como OG 1 mes. Esta cal en pasta envejeció en balsa a lo largo de un mes y posteriormente, hasta cuatro años, permaneció en laboratorio en bote de plástico cerrado y con contenido de agua suficiente para garantizar la conservación sin carbonatación.

Se observan los diferentes hábitos de los cristales de portlandita. Se identifican algunos cristales prismáticos donde se pueden apreciar de forma incipiente los planos de exfoliación y gran cantidad de cristales tabulares de hábitos lamelares con aristas bien definidas, y en algunos casos se observan redondeos de aristas y ángulos propios de procesos de alteración-disolución como consecuencia del envejecimiento. Asimismo se perciben agrupaciones de plaquetas submicrométricas, en forma de castillo de naipes y en formas más ordenadas, que hemos denominado de escamas de pescado, y aglomerados de partículas nanométricas.

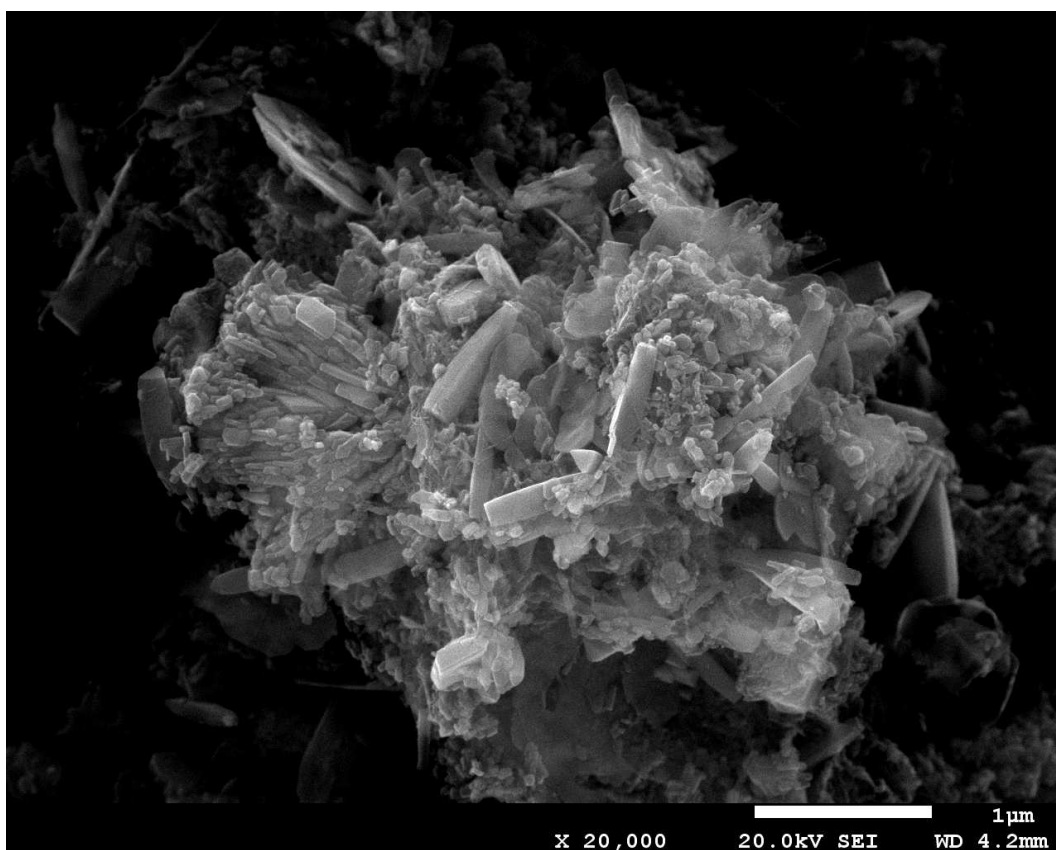


Figura 140 Aglomerado de cristales polimórficos en estructura multidireccional.

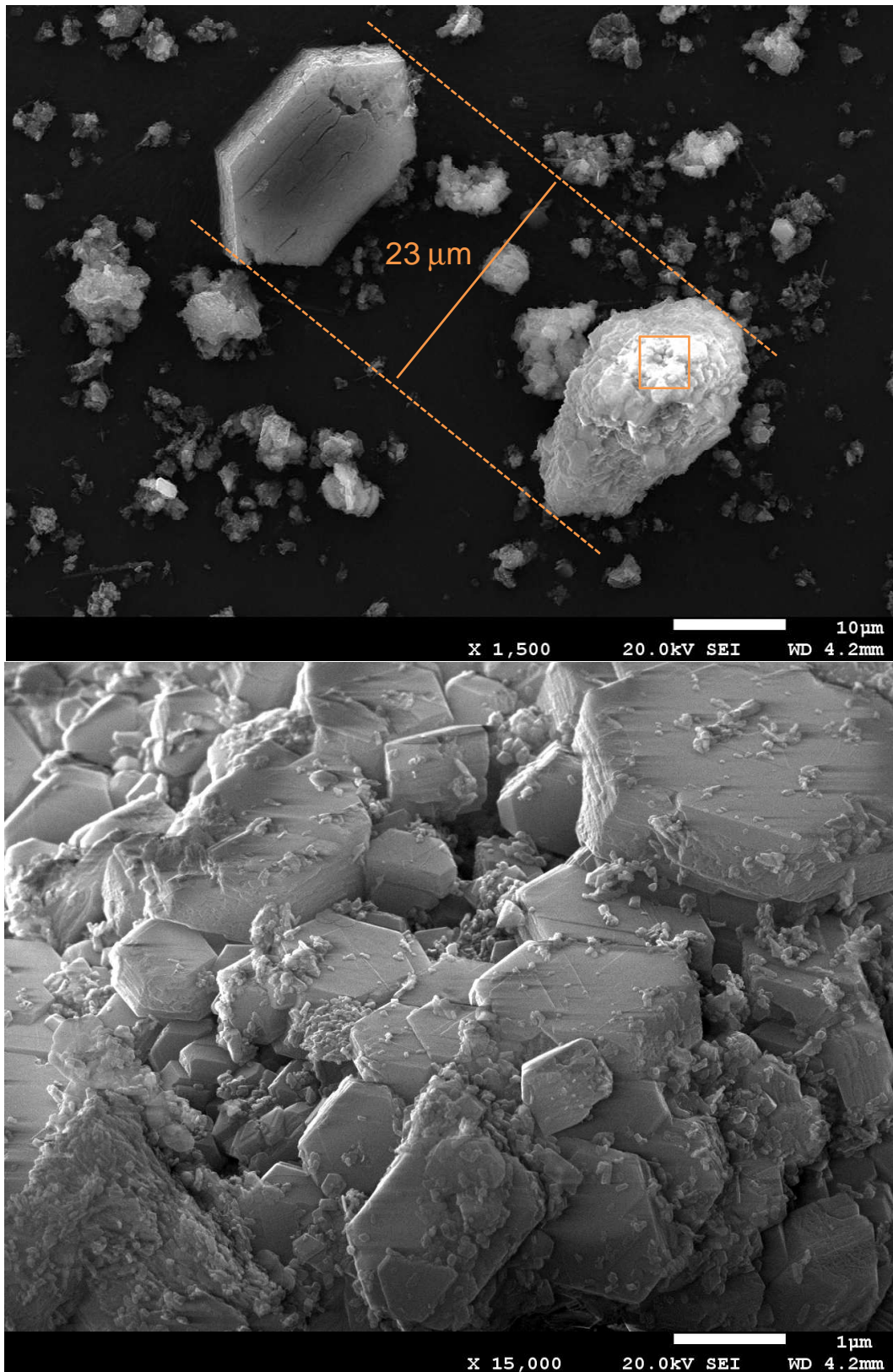


Figura 141 Visión bimórfica de la portlandita, donde se observan dos grandes partículas de dimensiones similares si bien una corresponde a un único gran cristal tabular mientras la otra está formada por un aglomerado de plaquetas micrométricas y submicrométricas (imagen inferior).

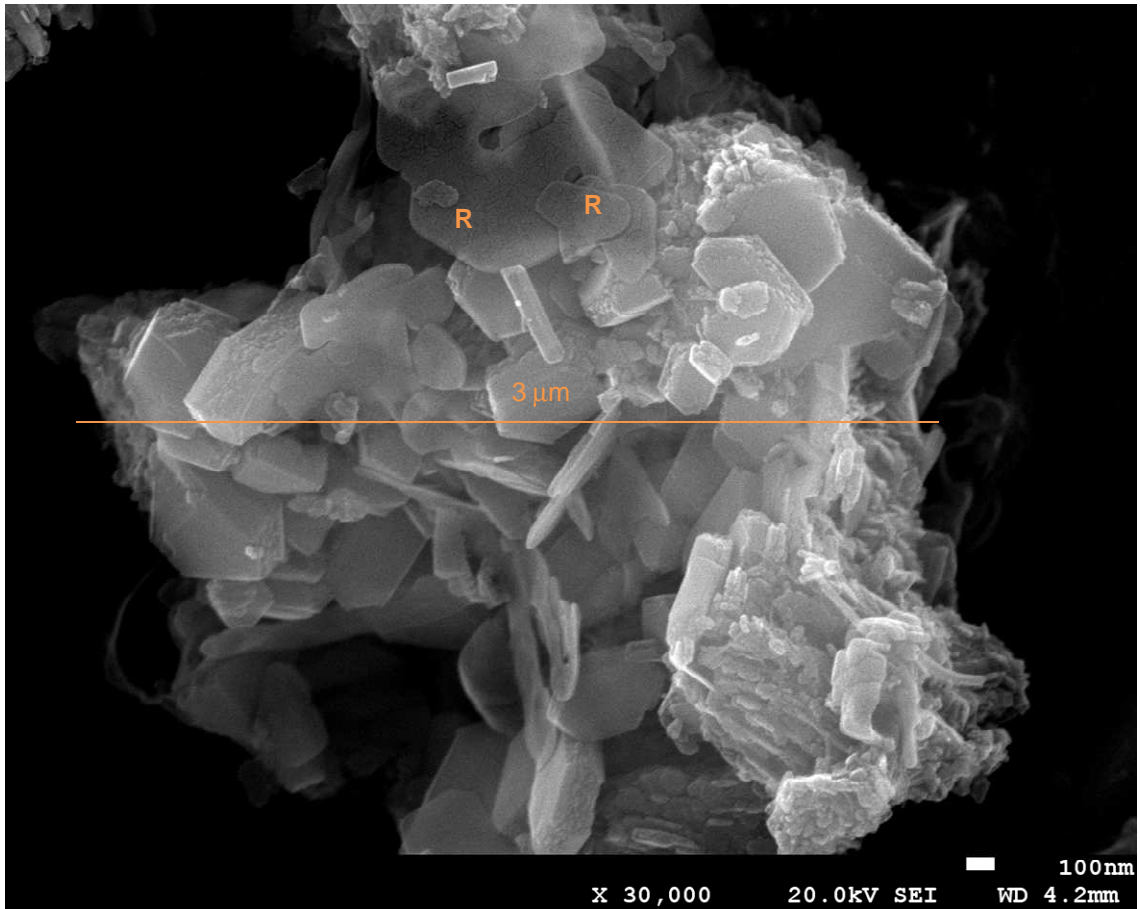


Figura 142 Aglomerado de cristales de portlandita, básicamente plaquetas y fragmentos de cristales tabulares, donde se aprecian (R) algunos cristales con bordes de reacción redondeados.

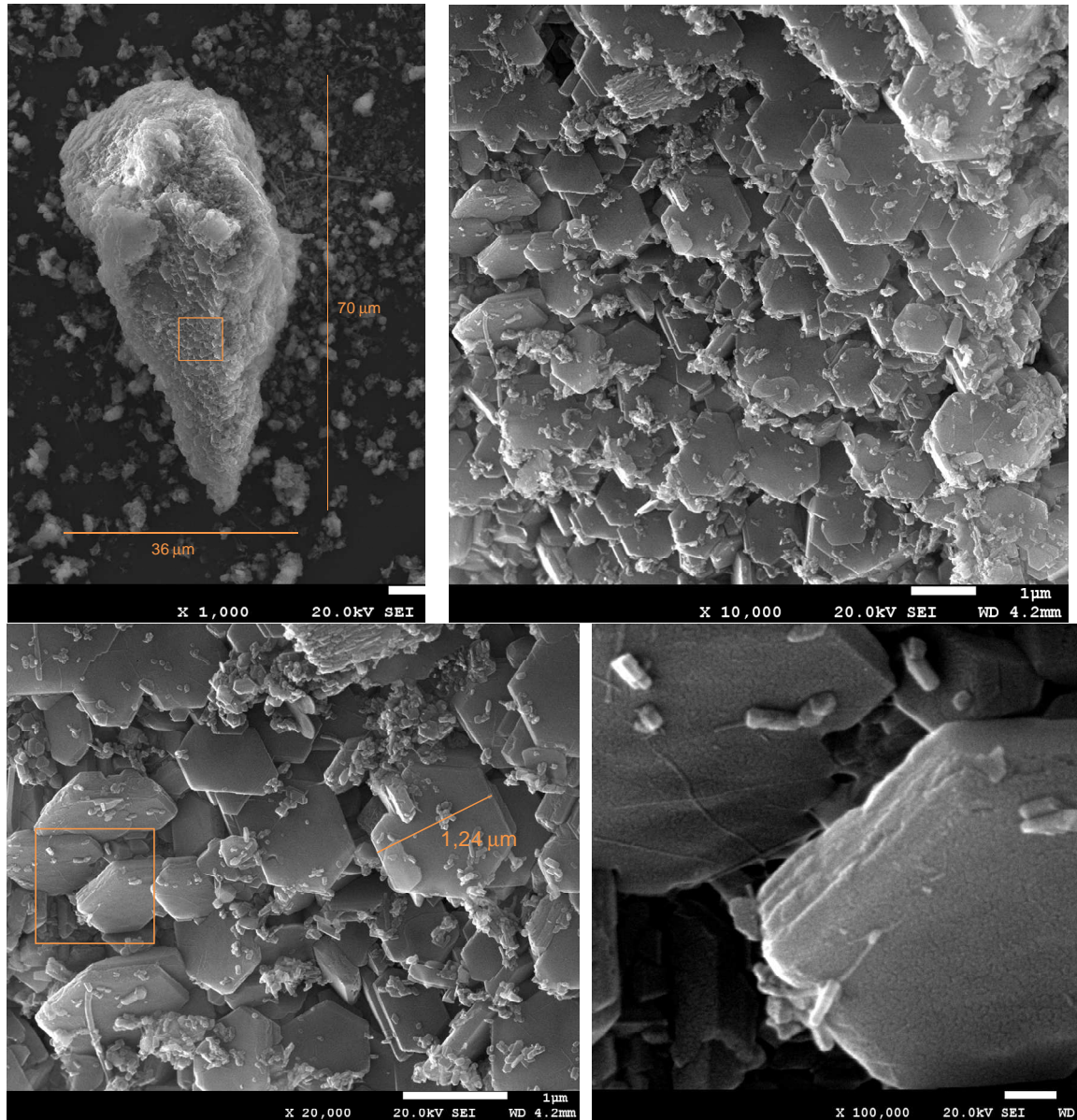


Figura 143 Diversas visiones de un gran aglomerado de plaquetas. Muestra una estructura de agregación de plaquetas tabulares considerablemente bien ordenadas, que podemos denominar de “escamas de pez”.

AKRA

Muestra de cal en pasta proveniente del apagado y envejecimiento de una cal viva de origen no conocido, (ver 4.2.1 Cales en pasta). Esta cal en pasta envejeció en balsa y/o en botes a lo largo de tres años según información facilitada por los comercializadores del producto y, posteriormente, durante cuatro años permaneció en laboratorio en bote de plástico cerrado y con contenido de agua suficiente para garantizar la conservación sin carbonatación.

La observación permite destacar la presencia de cristales prismáticos y tabulares en proceso de alteración de sus bordes y caras por disolución, deposición y recristalización de partículas menores. Las “roturas” en las caras 001 y las exfoliaciones en cristales lamelares paralelos a la cara 001 muestran direcciones preferentes consecuencia de la estructura trigonal propia del sistema hexagonal de la portlandita. También en este caso se observan aglomerados de partículas nanométricas, en algunos casos con claras orientaciones que se relacionan con las energías libres de las caras de los nanocristales.

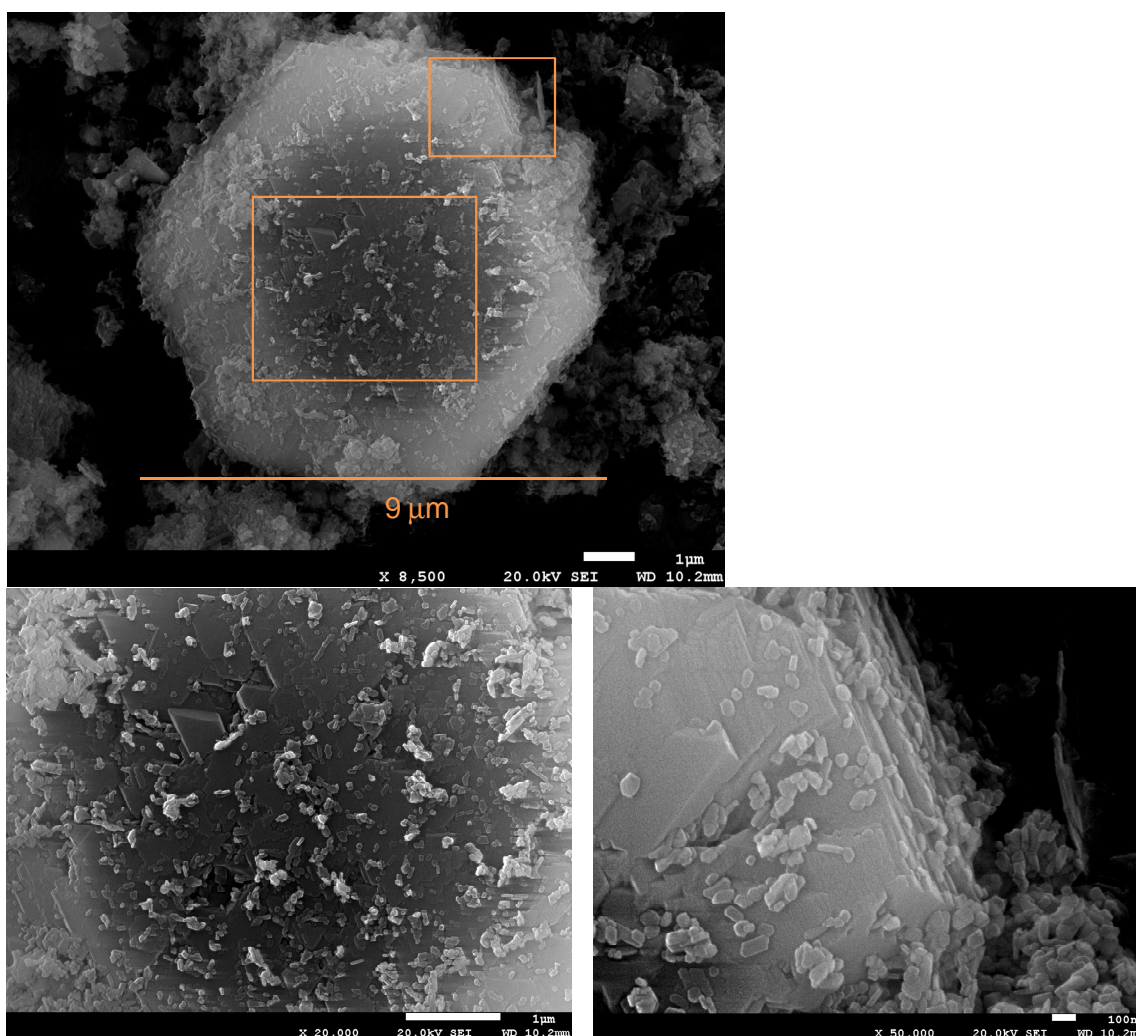


Figura 144 Gran cristal micrométrico de portlandita donde se observan las dislocaciones y las exfoliaciones.

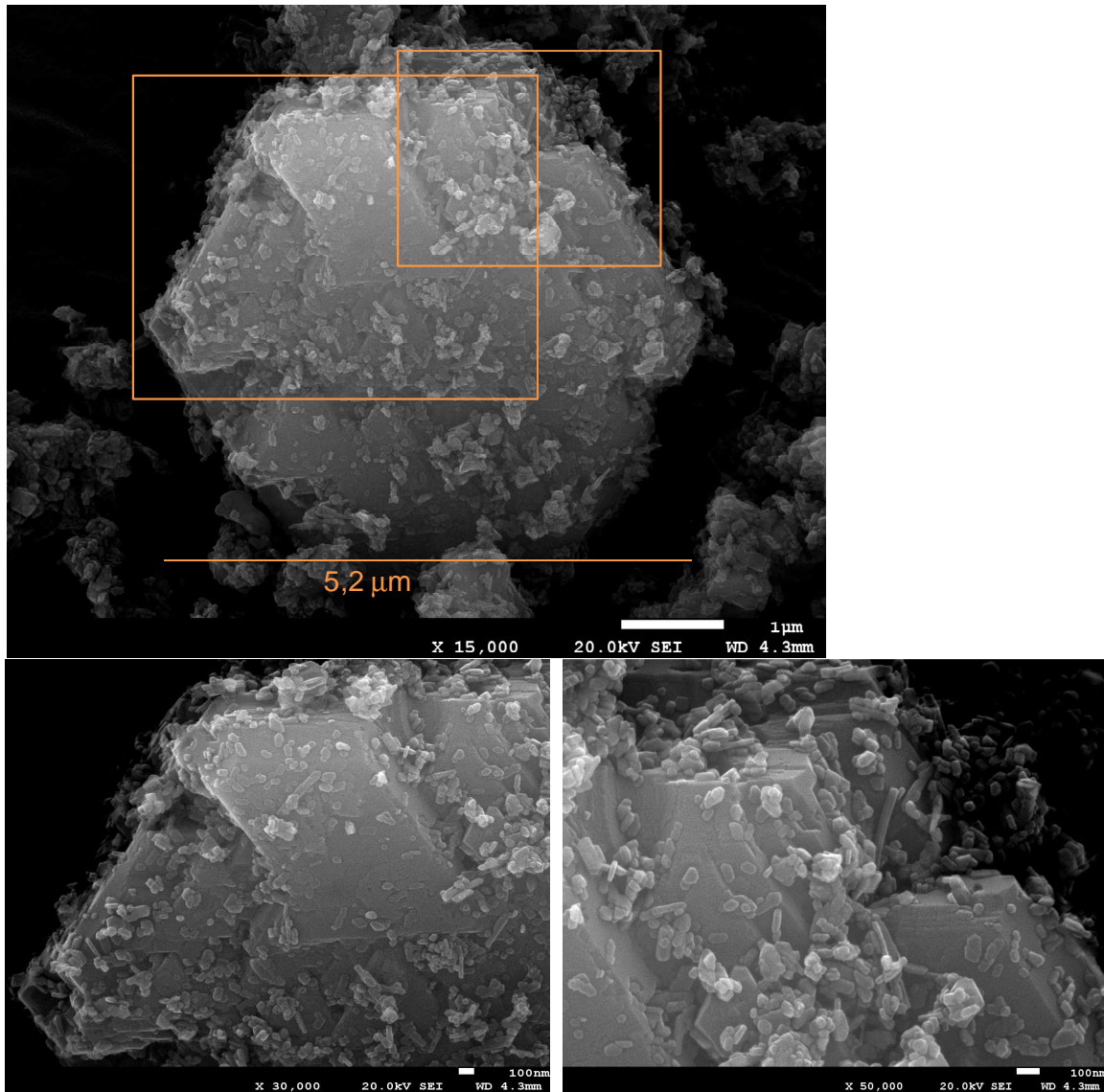


Figura 145 Cristal micrométrico de portlandita exfoliada romboédricamente, y con plaquetas nanométricas asociadas.

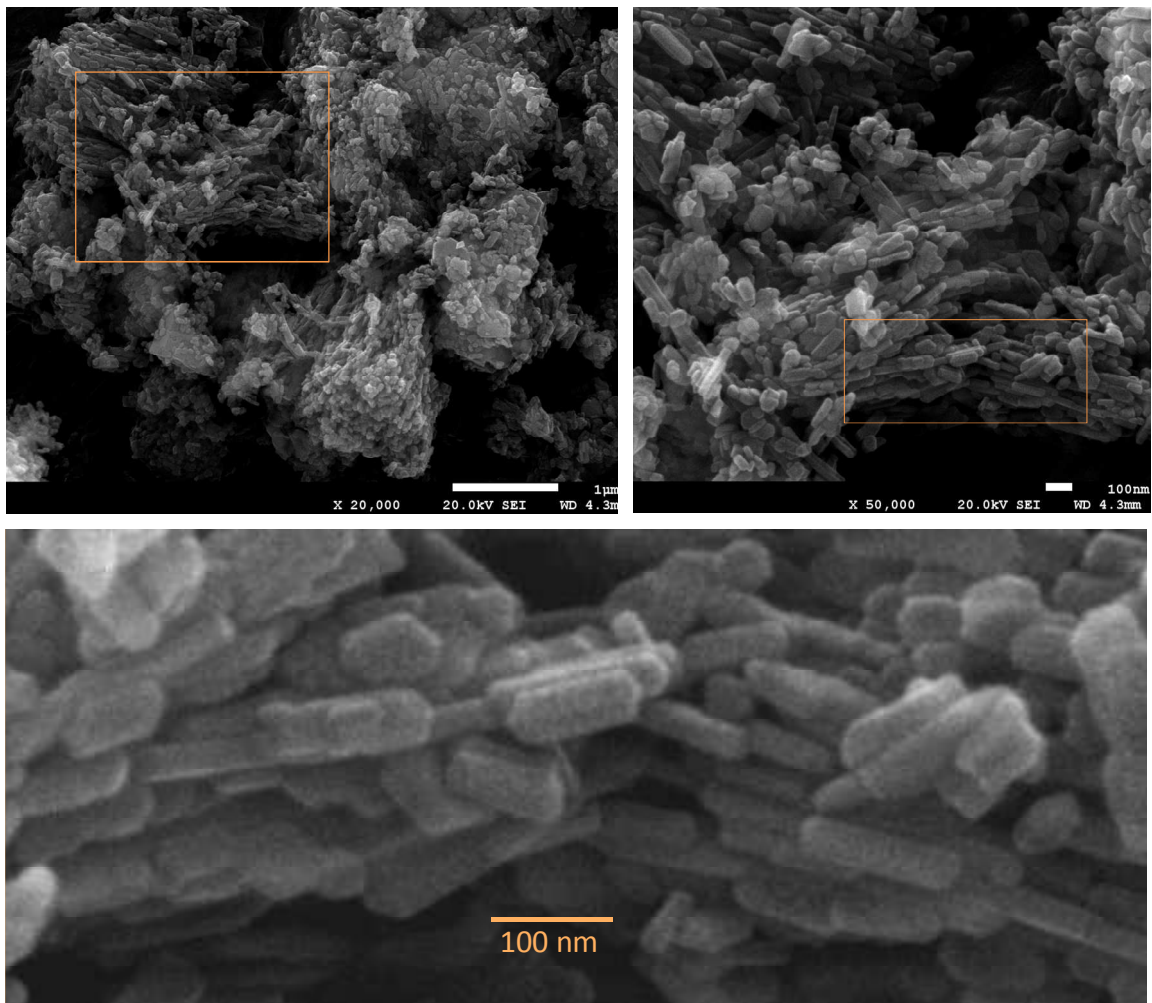


Figura 146 Conglomerado de cristales prismáticos nanométricos orientados.

Sevilla.

Muestra de cal en pasta proveniente del apagado y envejecimiento de una cal viva de Emilio Quílez (ver 4.2.1 Cales en pasta). Esta cal en pasta envejeció en balsa a lo largo de 24 años según información facilitada y, posteriormente, durante cuatro años permaneció en laboratorio en bote de plástico cerrado y con contenido de agua suficiente para garantizar la conservación sin carbonatación.

A diferencia de las anteriores cales, en esta la mayor parte de las partículas son aglomerados, no observándose apenas cristales lamelares sueltos.

Los cristales que se observan en los aglomerados son subredondeados, con bordes de reacción y de tamaños micrométricos, submicrométricos y nanométricos. En algunas partículas se sigue observando la exfoliación planar.

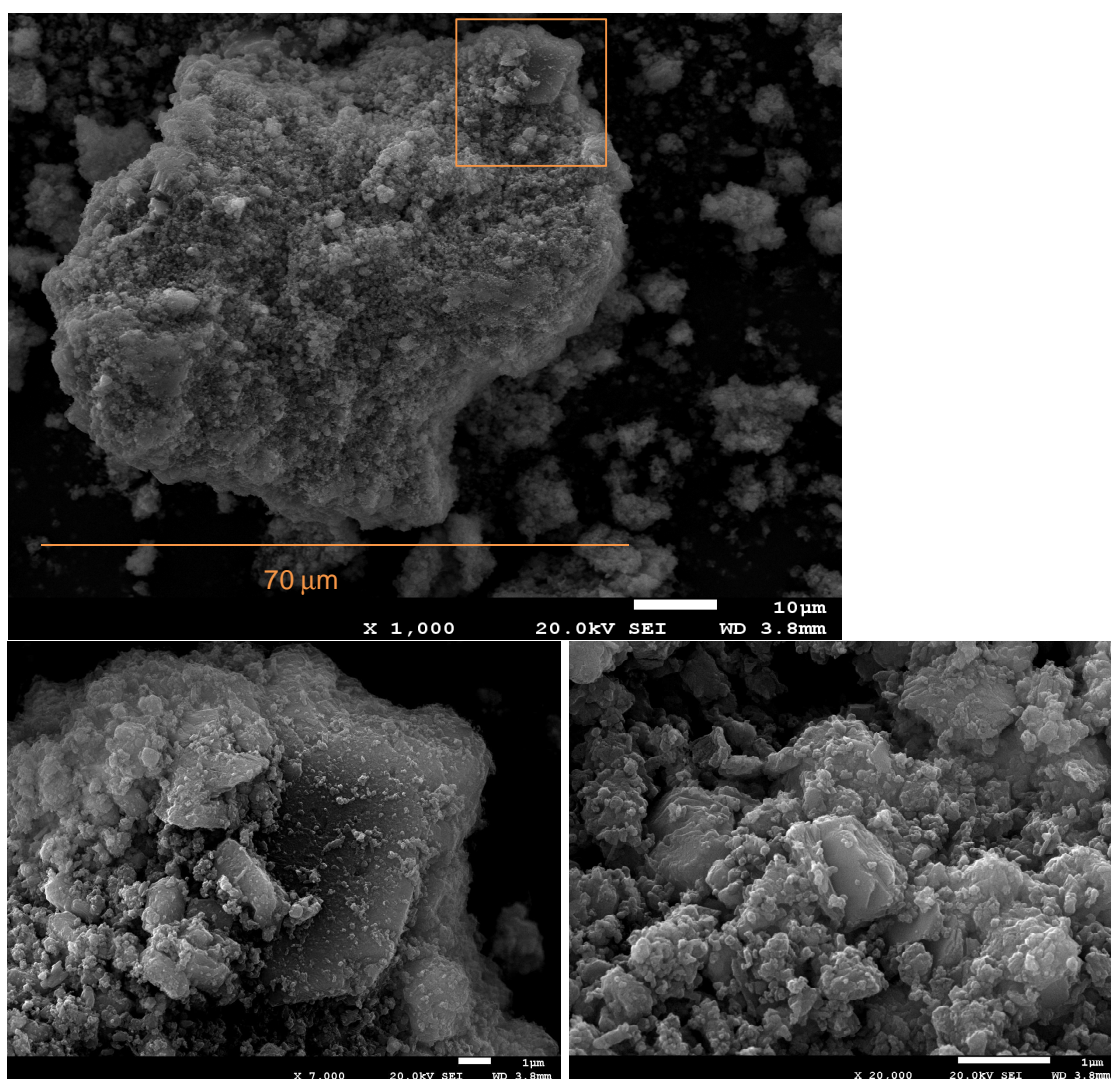


Figura 147 Gran partícula aglomerada formada por partículas subredondeadas, con bordes de reacción y de tamaños micrométricos, submicrométricos y nanométricos.

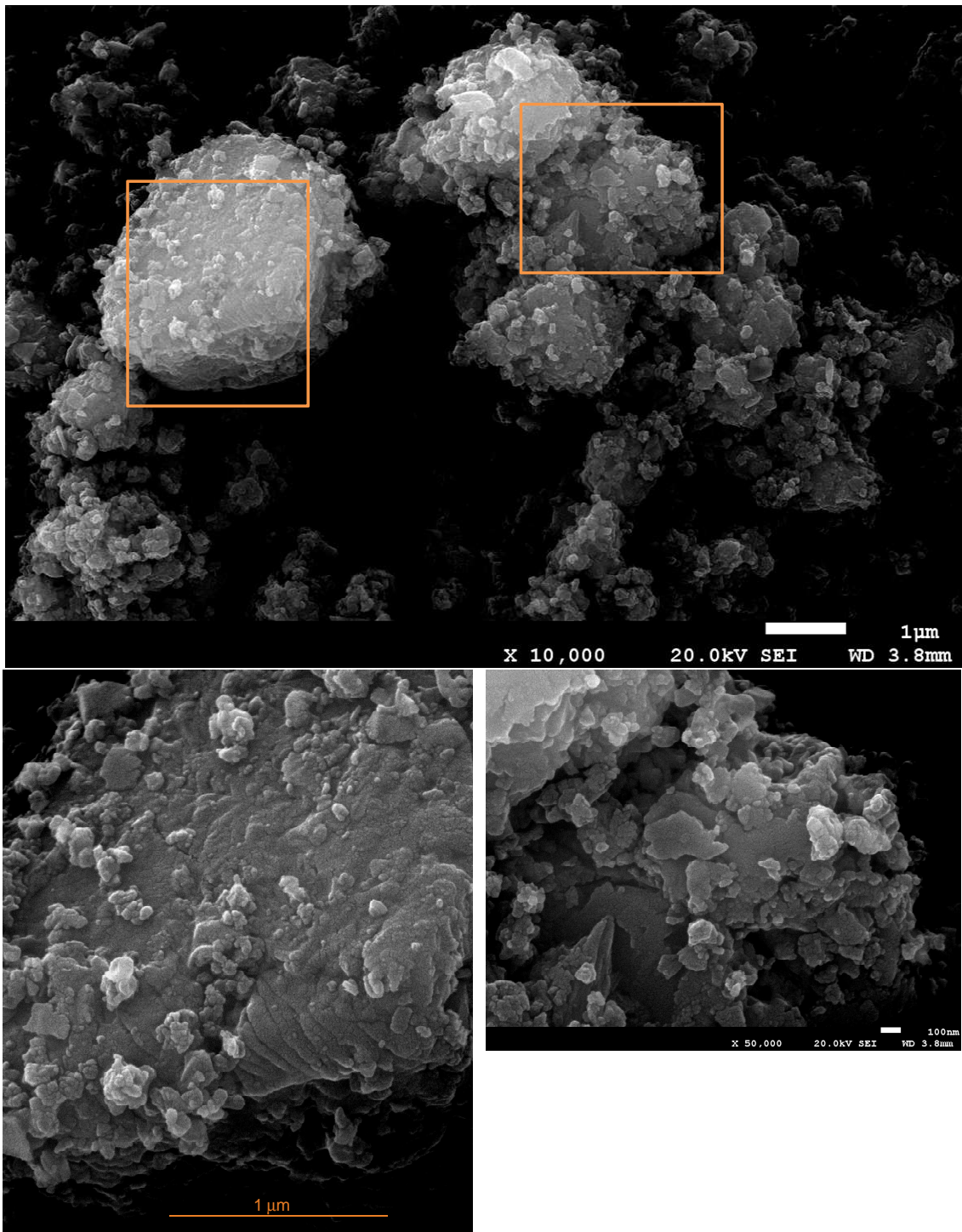


Figura 148 Aglomerados micrométricos de partículas mostrando bordes de reacción.

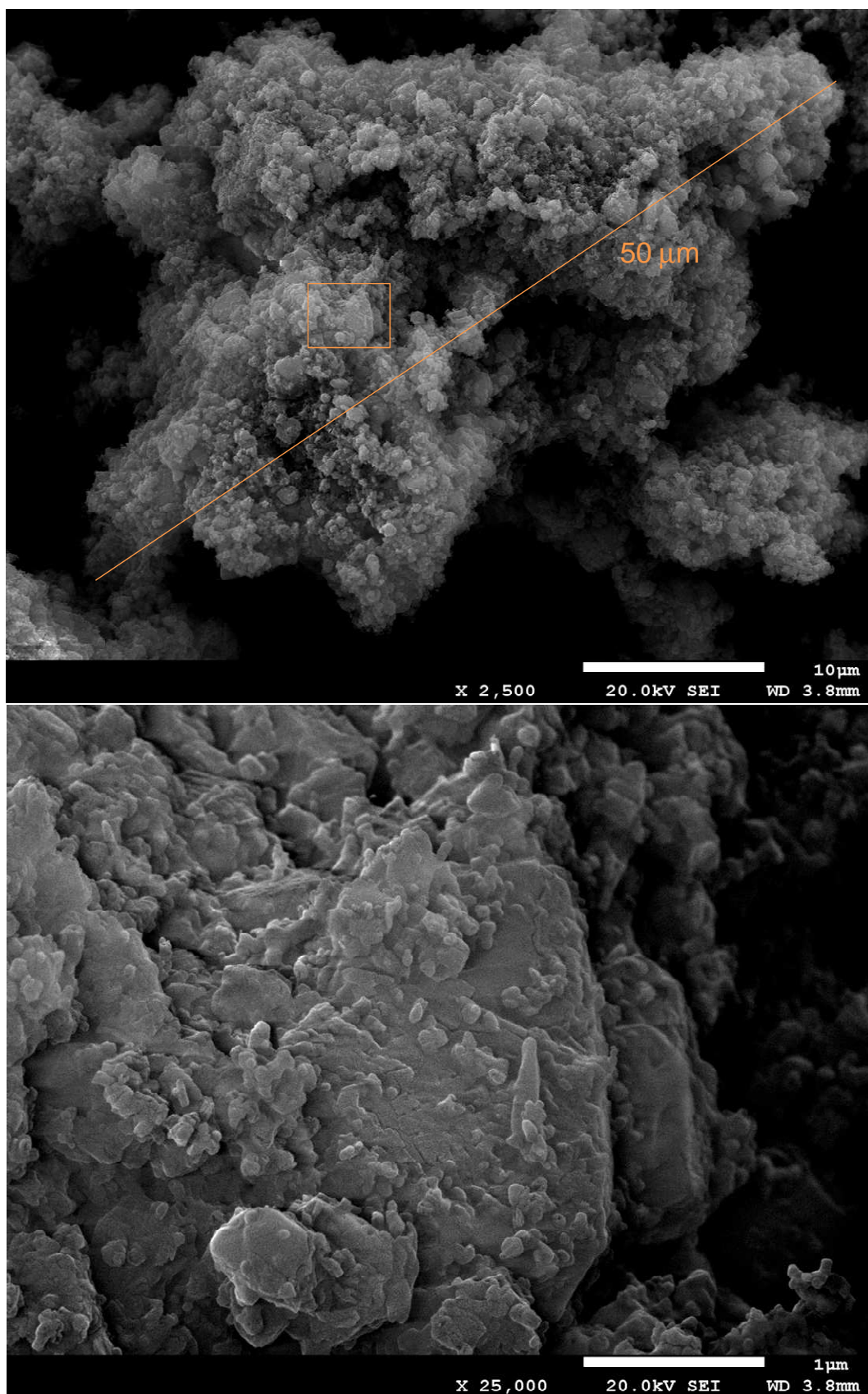


Figura 149 Aglomerados micrométricos de cristales alterados mostrando disoluciones y/o crecimientos cristalinos.

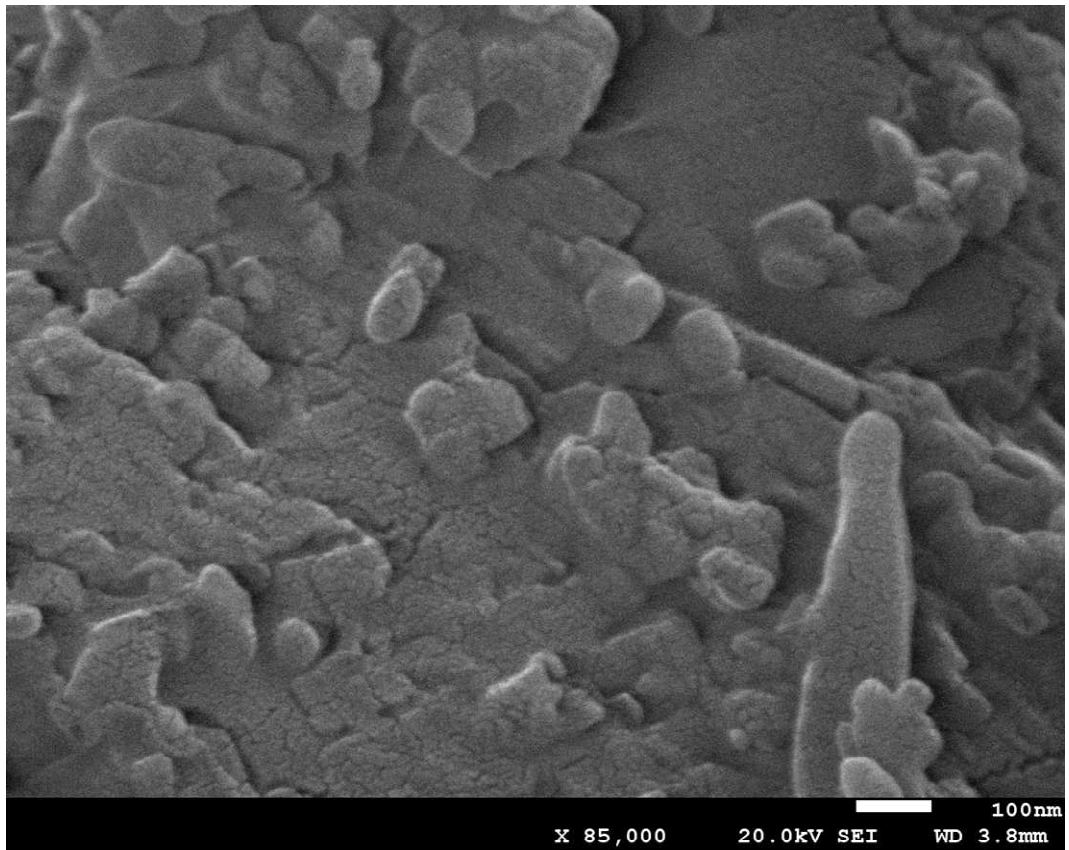


Figura 150 Detalle de la Figura 149 (inferior).

Cal cálcica industrial contemporánea, apagada con vapor.

Se trata de una cal cálcica en polvo CL 90S de origen industrial, apagada en un hidratador industrial de última generación que trabaja con escasa agua y realimenta el proceso con el propio vapor generado. Se consigue un apagado muy enérgico, a altas temperaturas y como consecuencia de ello se producen múltiples fracturas en los cristales formados que aumentan muy considerablemente la superficie específica de esta cal. Se prepara y observa como las anteriores.

Si bien la muestra presenta algunos problemas por escaso recubrimiento de paladio-platino, que se concretan en un aspecto de craqueado de las superficies de los cristales, se observan claramente las geometrías de los cristales tabulares con múltiples fracturas, ordenaciones pluridireccionales en castillos de naipes y cristales prismáticos con planos de exfoliación muy marcados como consecuencia del propio crecimiento cristalino.

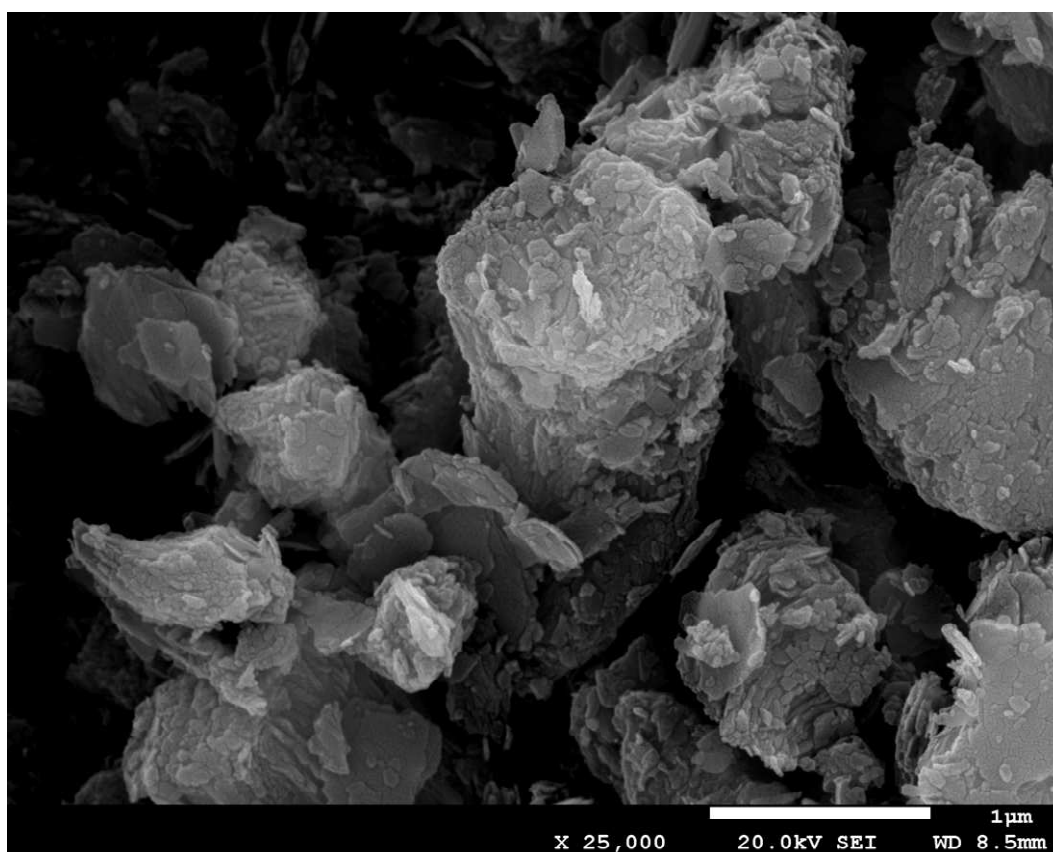


Figura 151 Cristal prismático central y otros pequeños cristales con un aspecto general de fracturas formadas inicialmente.

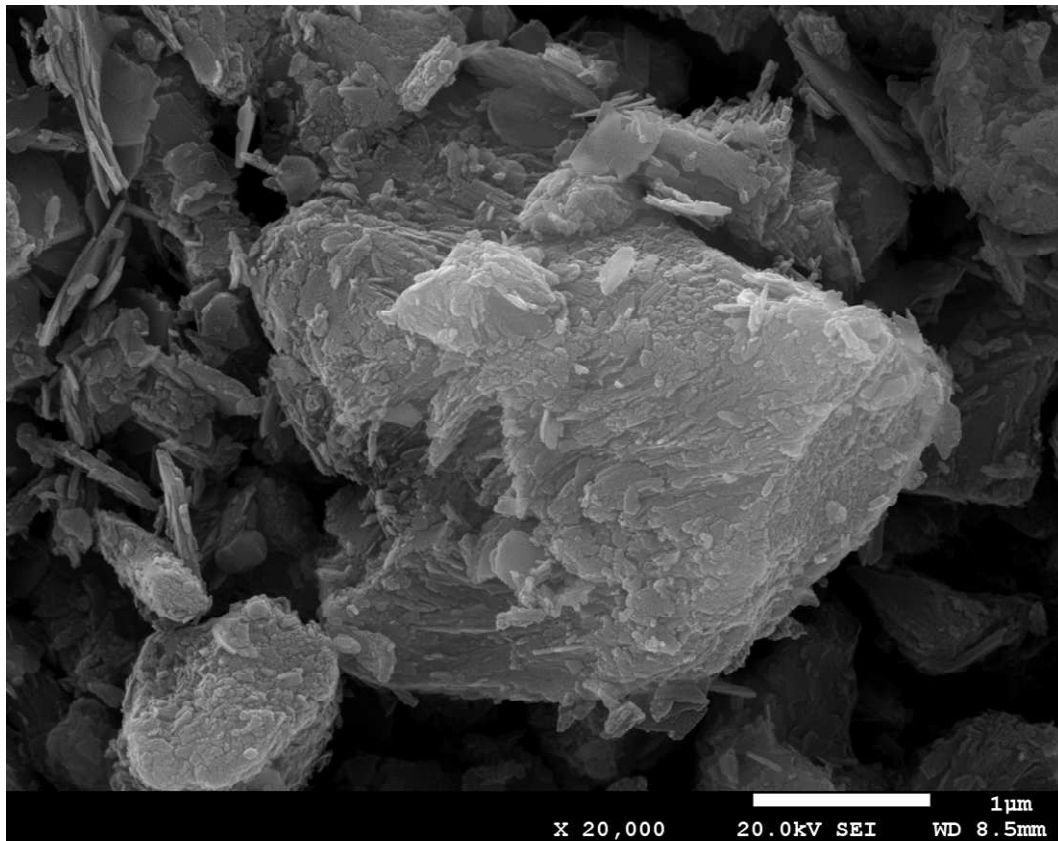


Figura 152 Partícula central (sin hábito cristalino concreto) y otros pequeños cristales, muchos de ellos de tipo lamelar, con un aspecto general de fracturas formadas inicialmente.

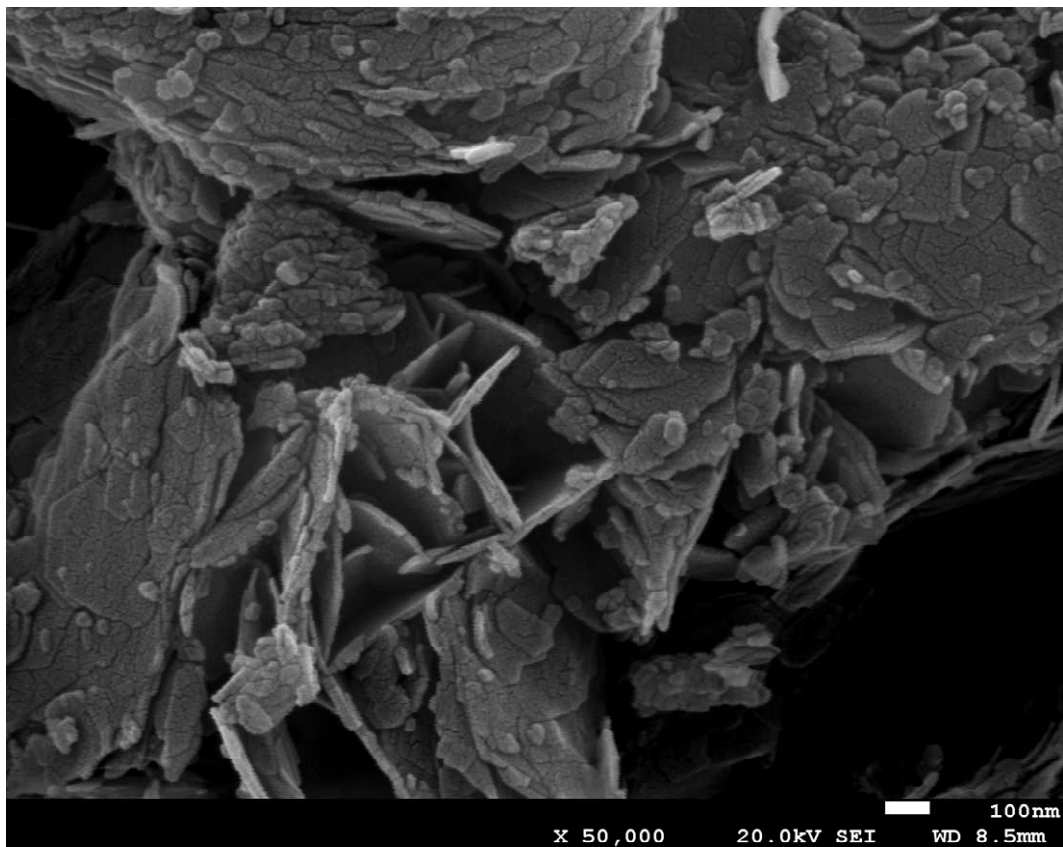


Figura 153 Estructura en “castillo de naipes” en un aglomerado de cal en polvo.

5.1.3.3 Discusión de los resultados observados en las microscopías.

De los resultados de las observaciones realizadas y de los conocimientos que emanan de la bibliografía consultada así como de las diferentes consultas realizadas a expertos cristalógrafos podemos exponer:

En el **apagado** de las cales observadas se generan diferentes formas cristalinas de la portlandita que se ordenan en diferentes estructuras, en función de multitud de factores tales como la temperatura, la concentración de la dispersión, el movimiento de las partículas en diferentes flujos, la sedimentación, las pequeñas impurezas, etc.

Típicamente se han observado cristales prismáticos de base hexagonal y formas tabulares también de base hexagonal regular que presentan tamaños submicrométricos en la cara 001 (plano hexagonal) (Figura 137, 141 y 143) hasta tamaños de algunas decenas de micras (Figura 136 y 140), por tanto en un rango que recorre dos órdenes de magnitud.

También se observan partículas procedentes de la fragmentación, ya a muy cortas edades, de cristales mayores de las formas tabulares y prismáticas descritas. Asimismo se han observado comúnmente aglomeraciones de cristales submicrométricos y nanométricos que responden a morfologías distintas (Figura 146).

A partir de las diferentes observaciones realizadas en **cales en pasta envejecidas** de distintas edades podemos explicar algunos procesos de evolución:

Los cristales prismáticos sufren fracturas en los planos débiles (fuerzas de Van der Waals) paralelos al 001 que tienden a generar pequeñas formas laminares y fragmentos de geometrías diversas. Con el paso del tiempo a este efecto de laminación se suma un efecto de alteración por disolución de las aristas y esquinas (mayor superficie específica) que tiende a “redondear” los cristales (Figura 154).

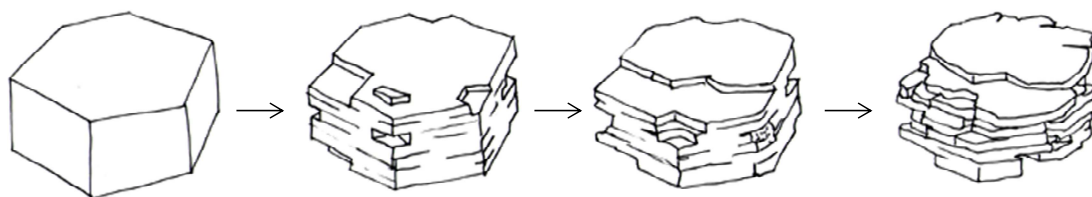


Figura 154 Evolución esquemática de un cristal prismático de portlandita

En referencia a los cristales tabulares se producen efectos similares si bien es más difícil observar laminaciones en plaquetas y es más común observar fragmentación de plaquetas y bordes de reacción (Figura 155).

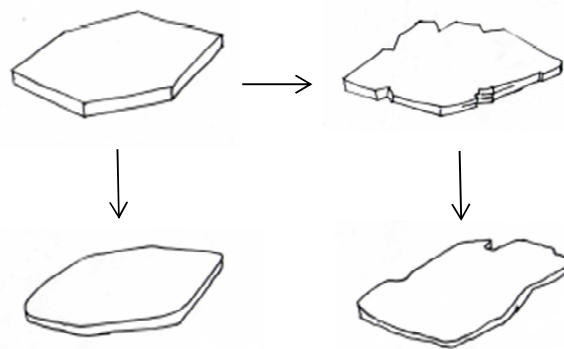


Figura 155 Evolución esquemática de un cristal tabular de portlandita

Se dan agregaciones de plaquetas en formas características, por un lado se observan estructuras en “castillos de naipes” (Figura 137 y 139), incluso en cales en polvo (Figura 153), agregaciones paralelas basales 001 en “escamas de pez” (Figura 143) y agregaciones multidireccionales (Figura 140).

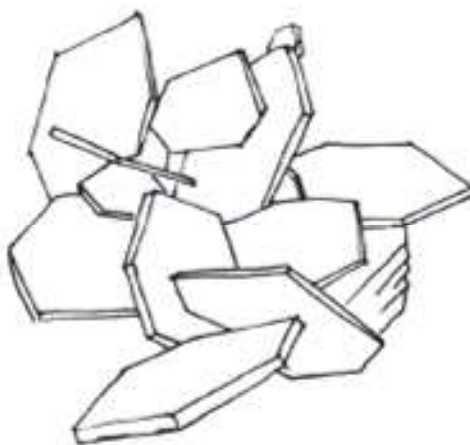


Figura 156 Estructura en "castillo de naipes".

También se observan pequeños cristales submicrométricos y mayoritariamente nanométricos dispersos en el medio, depositados en las superficies de cristales mayores o, tal vez, fijados con distintos grados de atracción a las superficies de cristales parejos o mayores, que le confieren a las observaciones un aspecto como el de la Figura 157.



Figura 157 Visión típica de una cal cálcica añeja en la que se dan laminaciones, fragmentaciones y bordes de reacción en los cristales prismáticos, con deposiciones, disoluciones y recrystalizaciones superficiales.

Finalmente parece que se dan procesos de reacción de bordes y esquinas simultáneamente a procesos de recrystalización lo que conlleva un importante aumento de la superficie específica de la cal, si se considera de manera desaglomerada.

De lo anteriormente dicho se concluye que es posible valorar cualitativamente el grado de “envejecimiento” de una cal en pasta a partir de unas buenas observaciones con SEM. Asimismo, las estructuras observadas junto a las formas cristalinas y sus tamaños nos serán de gran ayuda para comprender el comportamiento reológico de las calces en pasta.

5.2 Viscosidad de cales en pasta y pastas de cal

Al comentar cuestiones vinculadas a la cal con los profesionales responsables de su uso, tales como los albañiles con oficio, los estucadores, los restauradores, etc. conciben mayoritariamente en destacar como parámetro organoléptico por excelencia de la cal su untuosidad, su trabajabilidad. Hasta tal punto que consideran de mayor calidad la más untuosa, la de mayor trabajabilidad.

Ciertamente estas cualidades están muy vinculadas a los tamaños y formas de las partículas, los cuales influyen muy directamente en la velocidad de carbonatación o en la resistencia final del producto mortero. Asimismo estas cualidades las podemos ver reflejadas en la viscosidad, en la necesidad de realizar un cierto esfuerzo inicial para iniciar la movilización de la masa, en el esfuerzo necesario para extender el material, etc.

Como ya se ha comentado la medida de la viscosidad de una dispersión de cal no es trivial, por lo que se procedió a unas primeras determinaciones que fueron realizadas con un viscosímetro rotacional Brookfield DV-II, cedido por el Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Químicas de la Universidad de Barcelona (UB), el cual permite medir pares aplicados con precisiones del 1% (Figura 158). Al no estar conectado a un sistema de adquisición de datos en “continuo”, estos se tomaron manualmente en intervalos de 10 segundos.



Figura 158 Equipo de medición de la viscosidad Brookfield DV-II utilizado.

En el experimento se utilizó un cilindro de medición de 18,84 mm de diámetro y longitud equivalente de 74,9 mm. Para realizar las determinaciones se utilizó un recipiente estacionario de 120 mm de diámetro interno y profundidad de 200 mm. Cada muestra se preparó estacionando la muestra 24 horas y posteriormente se

decantó el agua superficial. La muestra se homogeneizaba previamente mediante agitación mecánica durante varios minutos antes de utilizarse en el viscosímetro. Según el funcionamiento del equipo se obtuvieron los diferentes valores del momento y velocidades de rotación. Posteriormente, se graficó el esfuerzo cortante (τ) en función del tiempo (t) y se determinaron los parámetros reológicos del gradiente de cizalla y del esfuerzo cortante. Finalmente se ajustó la curva por regresión lineal en escala log-log y se determinó el modelo que rige el comportamiento de la pasta.

Este primer trabajo fue presentado a las **II Jornadas de Investigación en Construcción**, desarrolladas en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, en Madrid en mayo de 2008. El texto completo de la ponencia presentada se encuentra en el Anexo 2.

Posteriormente un resumen del mismo se mostró en **X Congreso Nacional de Materiales**, en San Sebastián, España, en junio 2008. El poster presentado se encuentra en el Anexo 3.

Un segundo grupo de pruebas preliminares se realizó con el viscosímetro rotacional Viscotester que sirvió para el resto del estudio.

Este grupo de pruebas estaba encaminado a dominar la mecánica del ensayo así como a valorar la influencia de distintas variantes procedimentales en los resultados obtenidos.

5.2.1 Viscosidad de cales en pasta añejas y pastas de cal.

5.2.1.1 Concentraciones alrededor del 38 %

Se busca caracterizar las distintas cales escogidas y poder compararlas entre sí. Así resulta determinante la concentración de la dispersión dado que por un lado es de interés la concentración original y por el otro se desean concentraciones iguales que permitan las comparaciones.

Se parte de la **cal en pasta** de Emilio Quílez (Sevilla), por su reputación, lo que fija un valor de concentración máximo del 38 %. A partir de aquí se buscan cales de interés con concentraciones originales cercanas al 38% y superiores, dado que para obtener las diferentes concentraciones diluidas se ha procedido por adición de agua (destilada comercial) y homogeneización por amasado suave de la muestra.

Dado que algunas de las **cales en pasta** de las que se dispone tienen concentraciones prácticamente iguales (40 %) se escogen dichas cales (Akra, OG 24, OG60) y típicamente se preparan diluciones al 38 % y 36%.

Para las **pastas de cal** se dispone de una muestra de cal añeja Calcasa (Calcinor) al 32,5% de concentración y se preparan dos muestras con las dos cales en polvo industriales catalanas más comunes (Pachs CL80-S y Aries CL80-S).

Esta configuración de muestras de cales en pasta y pastas de cal y las distintas concentraciones permite a priori poder agrupar los resultados para establecer comparaciones y obtener conclusiones.

La relación de muestras ensayadas es la siguiente:

Tipo de cal	Codificación	Concentración	
Akra	AK-S1	36%	43,55% original
	AK-S2	38%	
	AK-S3	40%	
Sevilla (Quilez)	S-S1	36%	Original
	S-S2	38%	
Oriol García 24	OG24-S1	36%	Aprox original
	OG24-S2	38%	
	OG24-S3	40%	
Oriol García 60	OG60-S1	36%	Aprox original
	OG60-S2	38%	
	OG60-S3	40%	
Pachs (lab)	Pachs CL80-S	38%	Formuladas
Ciaries (lab)	Aries CL80-S	38%	Formuladas
Calcasa	Calcinor 4-S1	32,5%	Original añeja

Tabla 20 Relación y codificación de las muestras ensayadas con concentraciones cercanas al 38%

Seguidamente se exponen los resultados de las medidas de esfuerzo cortante necesario para mantener la deformación, así como los de viscosidad determinada para cada velocidad de deformación en función del tiempo de aplicación del par.

El protocolo de medida seguido ha sido el A1 (ver 4.3.2.4 *Metodología seguida para la medida de la viscosidad*).

Para mostrar los resultados se ha optado por reproducir de forma gráfica los resultados (r.p.m., τ) y las curvas de flujo ajustadas a los mismos así como los valores (r.p.m., η) y las curvas de viscosidad, calculadas para cada material y concentración.

Como explicación del proceso se reproduce el gráfico (por ejemplo Figura 159 Figura 159) de las medidas del esfuerzo cortante (τ) aplicado para mantener la velocidad de rotación a lo largo del tiempo (t) en las distintas velocidades. Estos gráficos permiten observar la curva de estabilización de la lectura.

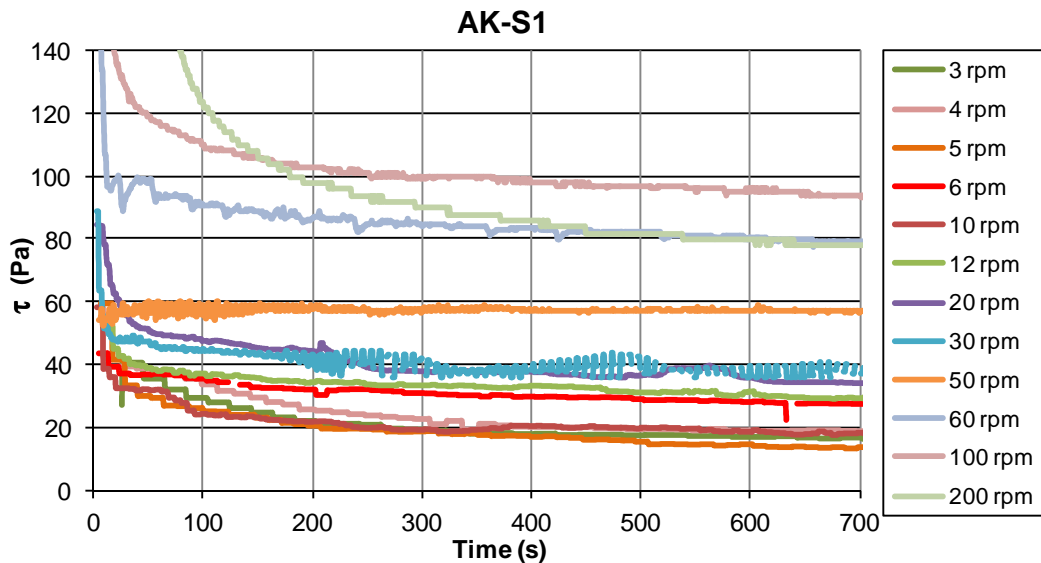


Figura 159 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36% donde se muestran las medidas del esfuerzo cortante aplicado (Pa) para mantener la velocidad de rotación a lo largo del tiempo (s) en las distintas velocidades (r.p.m.)

También se reproducen los gráficos correspondientes a las lecturas de valores de esfuerzo cortante y viscosidad (Figura 160 y 161) para un tiempo de ensayo determinado (media de las 20 lecturas anteriores a los 700 s. para las cales en pasta y media de las 20 lecturas anteriores a los 90 s. para las pastas de cal). Estos valores a tiempo constante permiten obtener funciones de ajuste de tipo potencial con niveles de correlación (R^2) significativos en la mayoría de los casos.

La función ajustada es del tipo

$$\tau = k \dot{\gamma}^n$$

Donde:

k = índice de consistencia n = índice de flujo

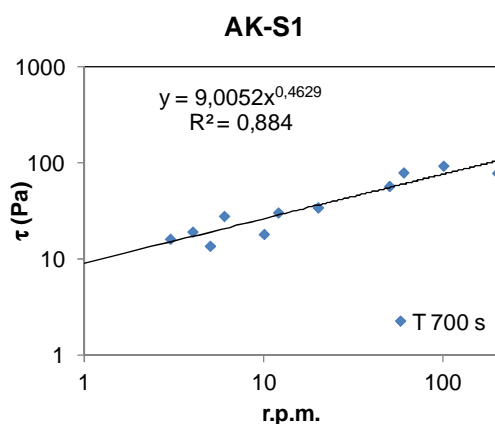


Figura 160 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36%, donde se muestran los valores de esfuerzo cortante para cada velocidad y la curva de flujo ajustada

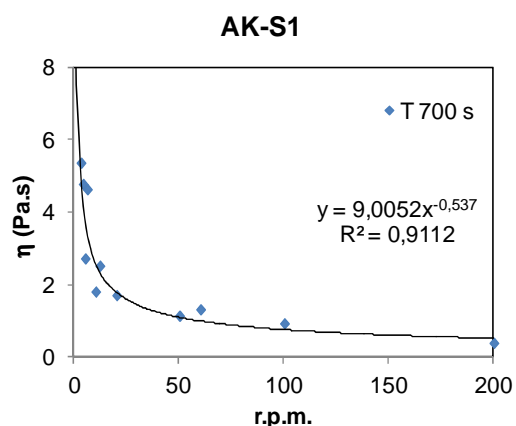


Figura 161 Gráfico correspondiente a la muestra AK-S1, con una concentración del 36%, donde se muestran los valores de viscosidad para cada velocidad y la curva de viscosidad ajustada

Finalmente, para la comparación de las diferentes cales se procede agrupándolas por concentraciones y tipos y se reflejan los modelos ajustados a las medidas.

AKRA.

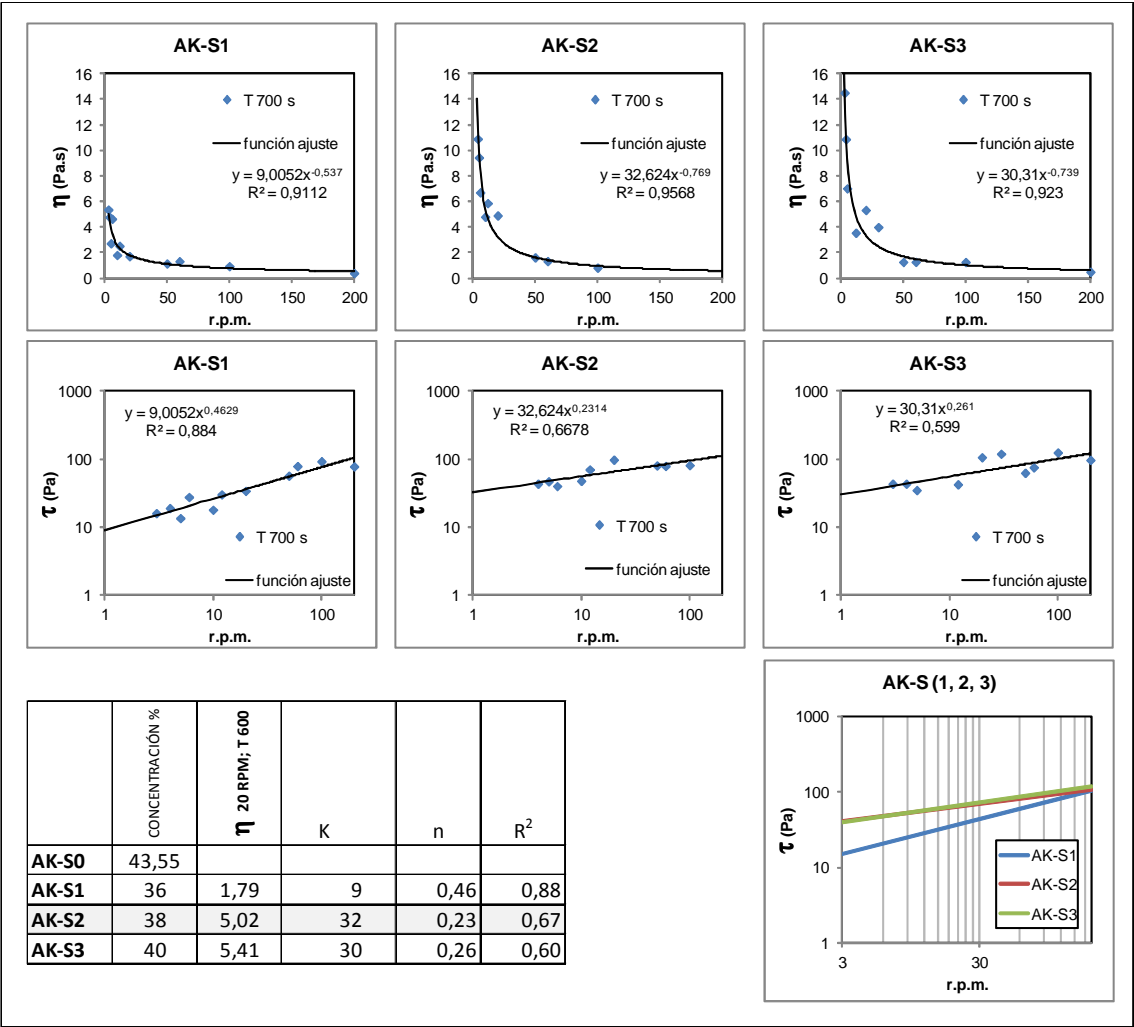


Figura 162 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal AKRA en diferentes concentraciones.

Sevilla (Quílez)

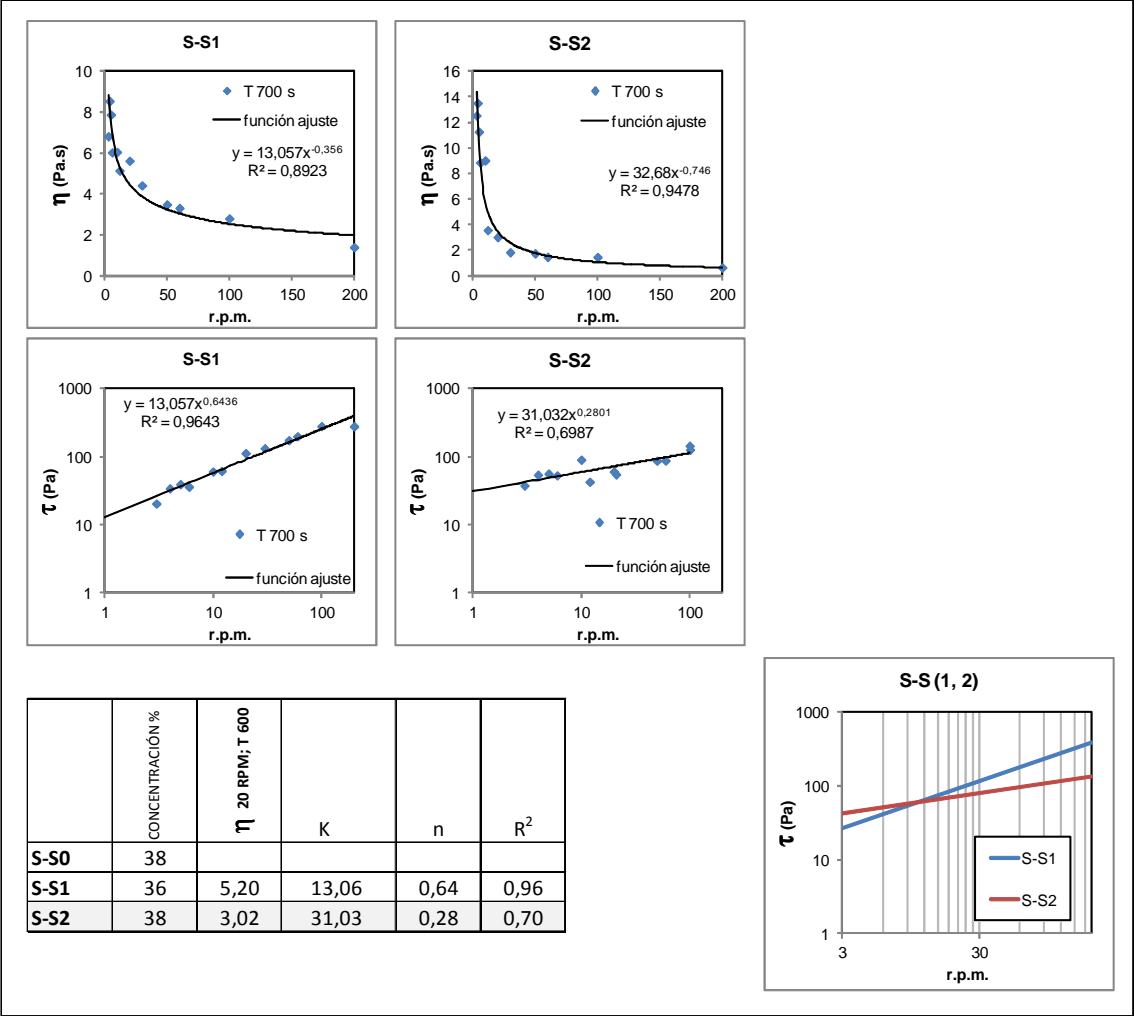


Figura 163 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal Sevilla (Quílez) en diferentes concentraciones.

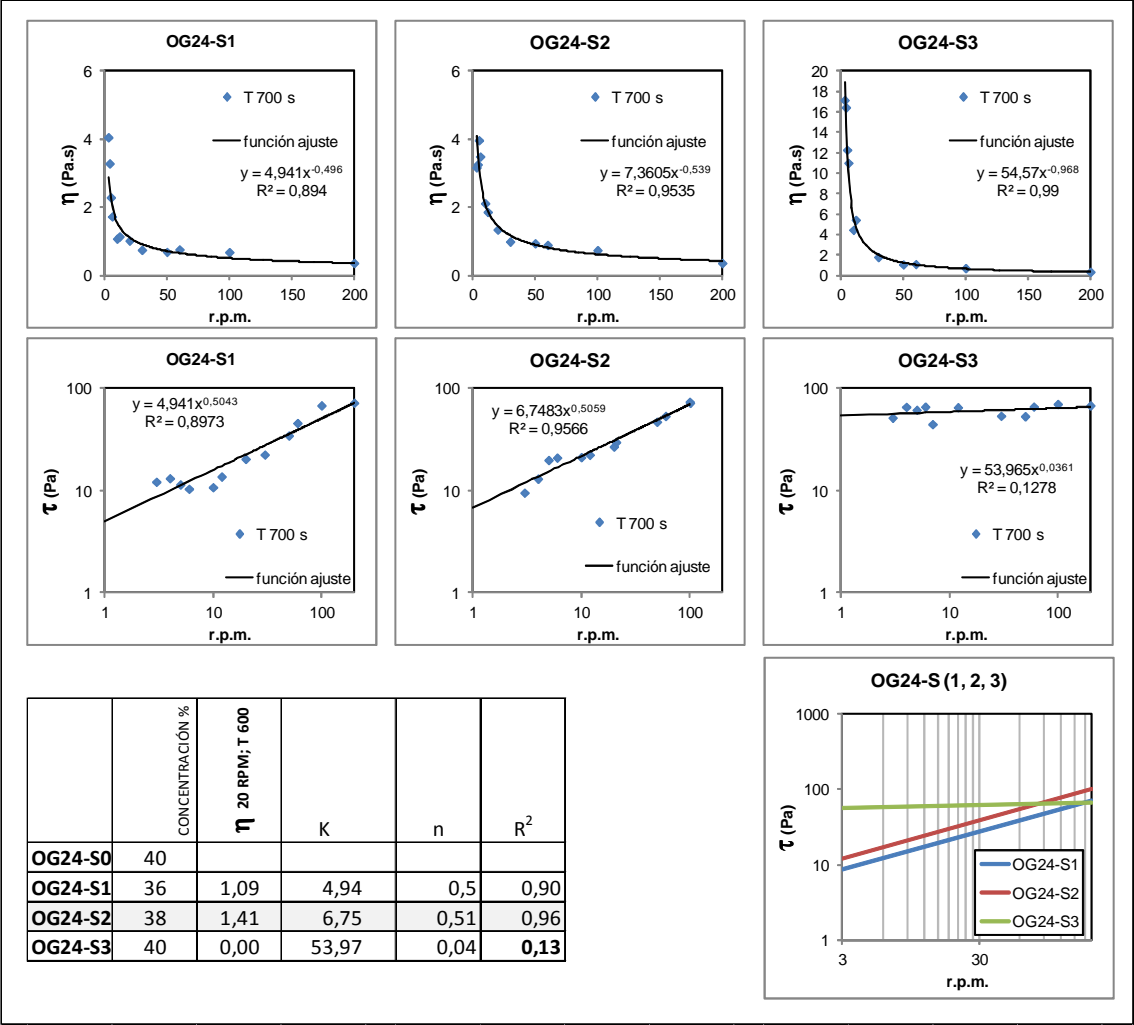


Figura 164 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal O.G. 24 en diferentes concentraciones.

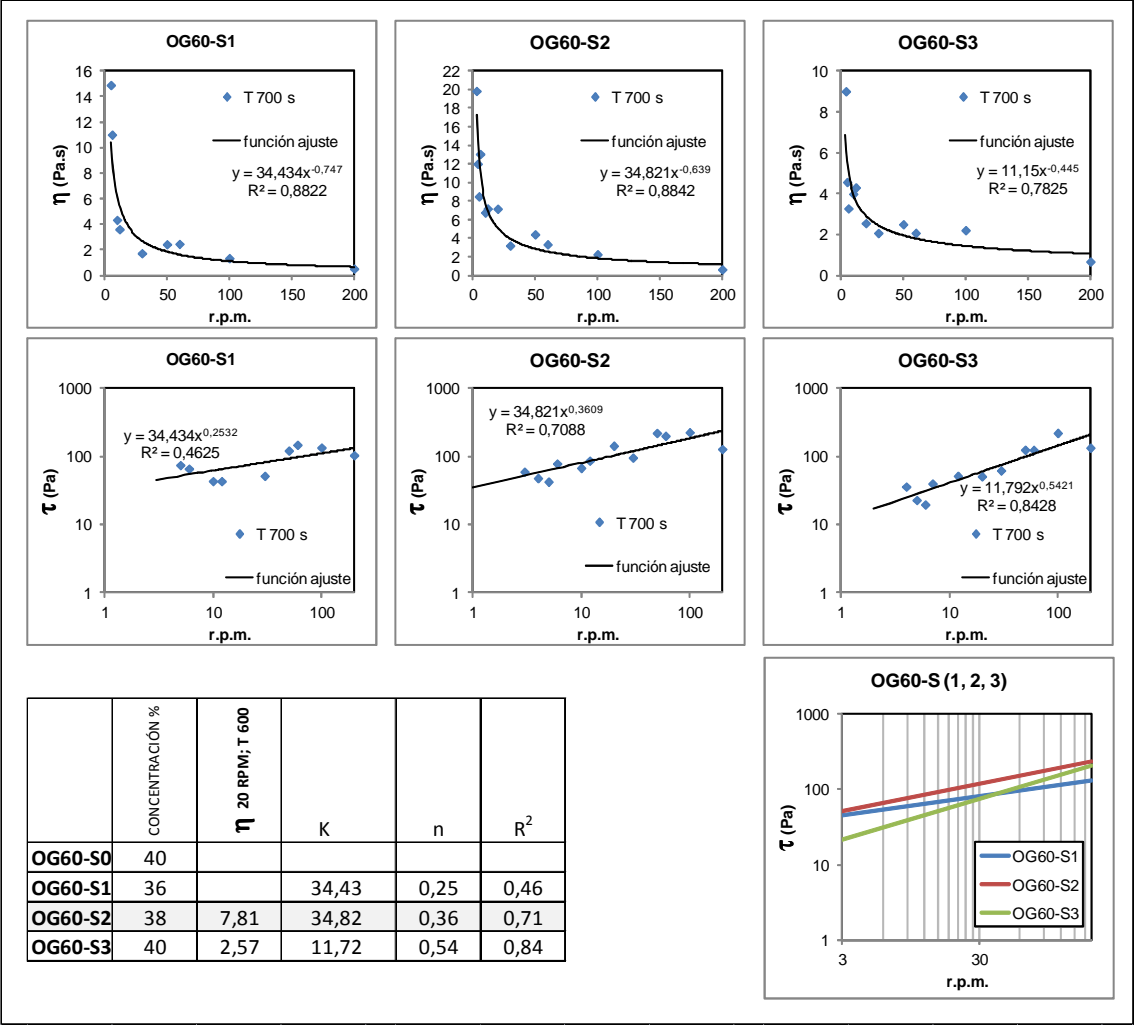


Figura 165 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para la cal O.G. 60 en diferentes concentraciones.

Pastas de cal: Pachs, Ciaries, Calcasa.

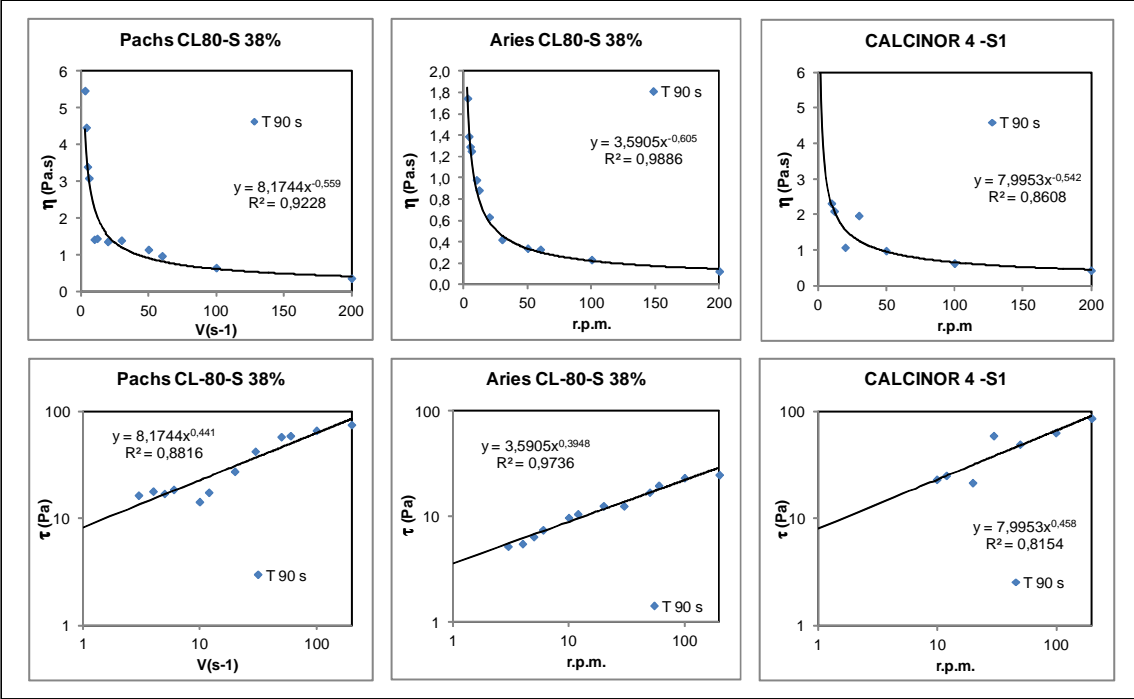
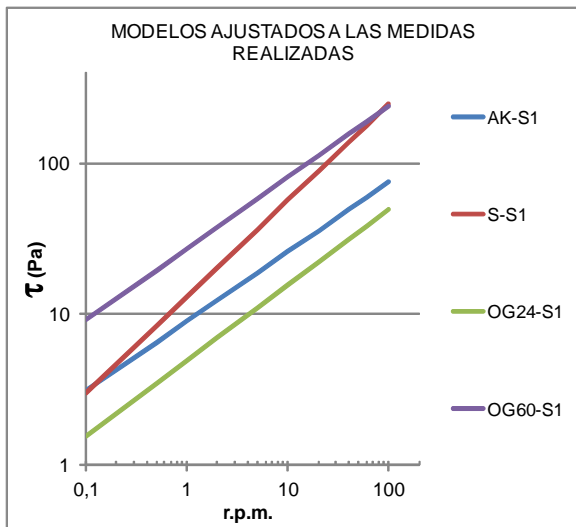
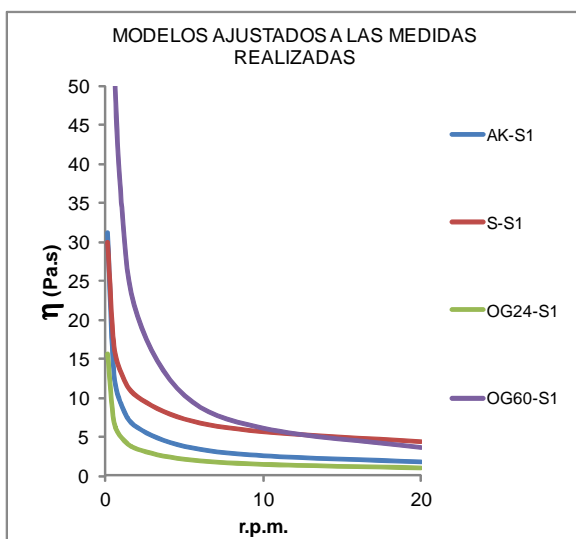


Figura 166 Resumen de resultados correspondientes a las mediciones de esfuerzo cortante y viscosidad, para distintas velocidades de ensayo y funciones de ajuste, para las pastas de cal Pachs, Ciaries y Calcasa.

MODELOS AJUSTADOS A LAS MEDIDAS REALIZADAS



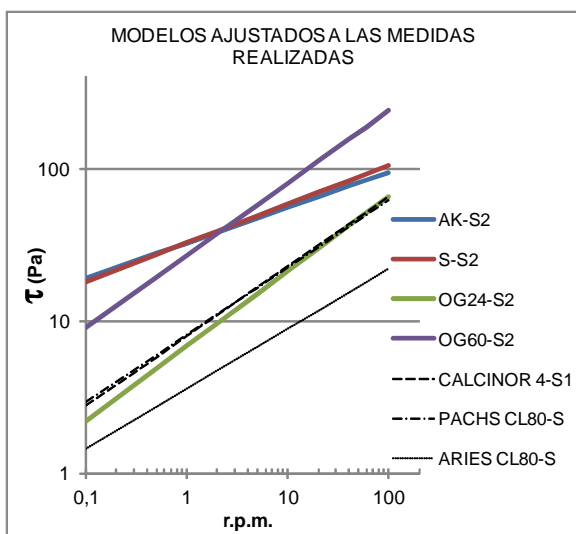
Cales en pasta	CONCENT RACIÓN	TIEMPO ENSAYO	$\tau = K \cdot \gamma^n$ $n < 1$	
			F. pseudoplástico	
			K	n
AK-S1	36%	700 S	9,00	0,46
S-S1	36%	700 S	13,06	0,64
OG24-S1	36%	700 S	4,94	0,50
OG60-S1	36%	700 S	34,43	0,25



Cales en pasta	CONCENT RACIÓN	TIEMPO ENSAYO	r.p.m. = 10	
			η (Pa·s)	τ (Pa)
AK-S1	36%	700 S	2,60	26,0
S-S1	36%	700 S	5,70	57,0
OG24-S1	36%	700 S	1,56	15,6
OG60-S1	36%	700 S	6,12	61,2

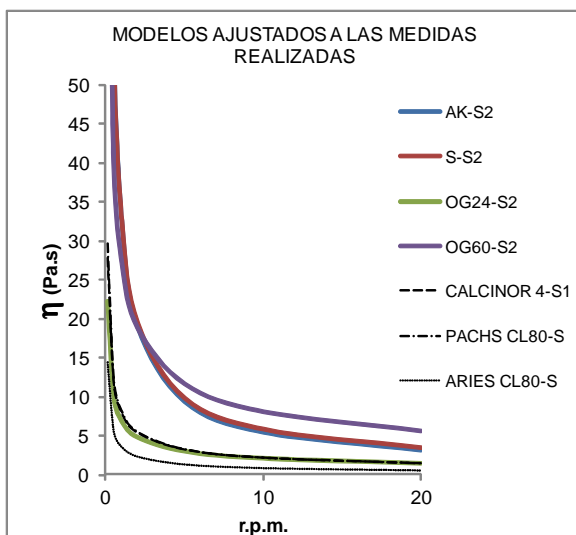
Figura 167 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 36%. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η), para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.

MODELOS AJUSTADOS A LAS MEDIDAS REALIZADAS



	CONCEN TRACIÓN	TIEMPO ENSAYO	$\tau = K \cdot \gamma^n$ $n < 1$ F. pseudoplástico	
			K	n
Cales en pasta				
AK-S2	38%	700 S	32,62	0,23
S-S2	38%	700 S	32,68	0,25
OG24-S2	38%	700 S	6,88	0,49
OG60-S2	38%	700 S	27,13	0,47

Pastas de cal				
CALCINOR 4-S1	32,5%	90 s	7,99	0,46
PACHS CL80-S	38%	90 S	8,17	0,44
ARIES CL80-S	38%	90 S	3,59	0,39

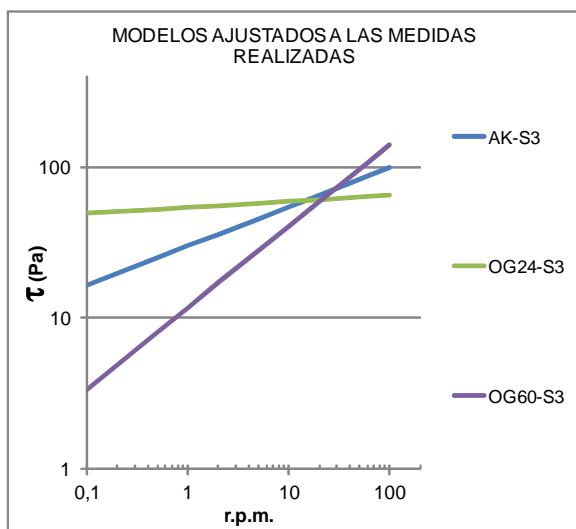


	CONCEN TRACIÓN	TIEMPO ENSAYO	r.p.m. = 10	
			η (Pa.s)	τ (Pa)
Cales en pasta				
AK-S2	38%	700 S	5,56	55,6
S-S2	38%	700 S	5,87	58,7
OG24-S2	38%	700 S	2,13	21,3
OG60-S2	38%	700 S	8,07	80,7

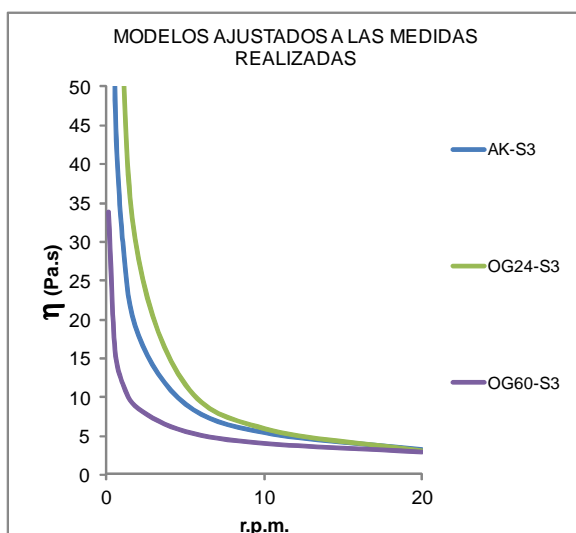
Pastas de cal				
CALCINOR 4-S1	32,5%	90 S	2,29	22,9
PACHS CL80-S	38%	90 S	2,26	22,6
ARIES CL80-S	38%	90 S	0,89	8,9

Figura 168 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 38 %. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η), para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.

MODELOS AJUSTADOS A LAS MEDIDAS REALIZADAS



Cales en pasta	CONCENT RACIÓN	TIEMPO ENSAYO	$\tau = K \cdot \gamma^n \quad n < 1$	
			F. pseudoplástico	
			K	n
AK-S3	40%	700 S	30,00	0,26
OG24-S3	40%	700 S	53,97	0,04
OG60-S3	40%	700 S	11,72	0,54



Cales en pasta	CONCENT RACIÓN	TIEMPO ENSAYO	r.p.m. = 10	
			η (Pa.s)	τ (Pa)
AK-S3	40%	700 S	5,46	54,6
OG24-S3	40%	700 S	5,92	59,2
OG60-S3	40%	700 S	4,06	40,6

Figura 169 Modelos exponenciales ajustados a las distintas cales analizadas en concentraciones del 40 %. Se muestran los valores del Índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n), así como los valores correspondientes al esfuerzo cortante (τ) y la viscosidad (η) para velocidades de desplazamiento de 10 rpm.

5.2.1.2 Concentración del 30%

Las concentraciones elevadas, cercanas a las originales, presentan mayor dificultad en la medida de su viscosidad, sin embargo concentraciones más diluidas permiten mejores procesos de medida, que si bien no representan la viscosidad original si permiten la comparación entre ellas.

Con este fin se han estudiado algunas de las cales anteriores en concentraciones del 30 % preparadas, nuevamente, añadiendo agua a las cales en pasta originales y removiendo suavemente hasta la homogeneidad. Se han estudiado 5 cales en pasta añejas y una pasta de cal añeja (Tabla 21).

Al tratarse de concentraciones más diluidas se plantea la posibilidad de procesos de sedimentación a lo largo de la medición de la viscosidad por lo que se ha escogido el protocolo A2 (ver 4.3.2.4 Metodología seguida para la medida de la viscosidad.) para dicho ensayo.

Tipo de cal	Codificación	Concentración
Akra	Akra	30%
Sevilla (Quilez)	Quílez	30%
Morón	Morón	30%
Oriol García 60	OG60	30%
Unicmall	Unicmall	30%
Calcasa	Calcinor	30%

Tabla 21 Relación y codificación de las muestras ensayadas con concentraciones al 30%

Los resultados de las medidas individuales se muestran en la Figura 170. Como se puede observar no se dan prácticamente procesos de sedimentación ni a lo largo de la medida con rotación ni después de los tiempos de interrupción.

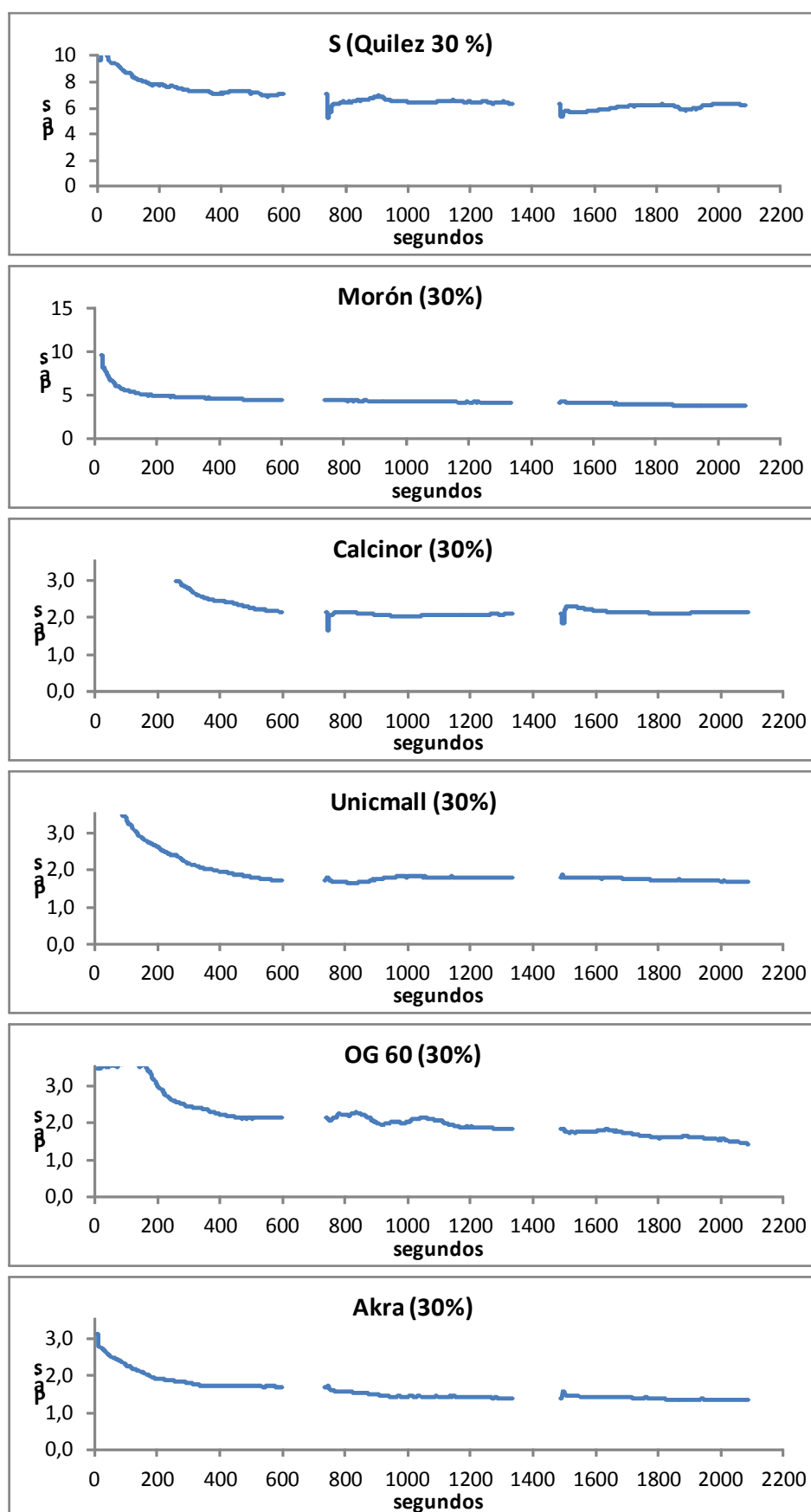


Figura 170 Resultados de las medidas de viscosidad/tiempo en las concentraciones de cales añejas al 30%

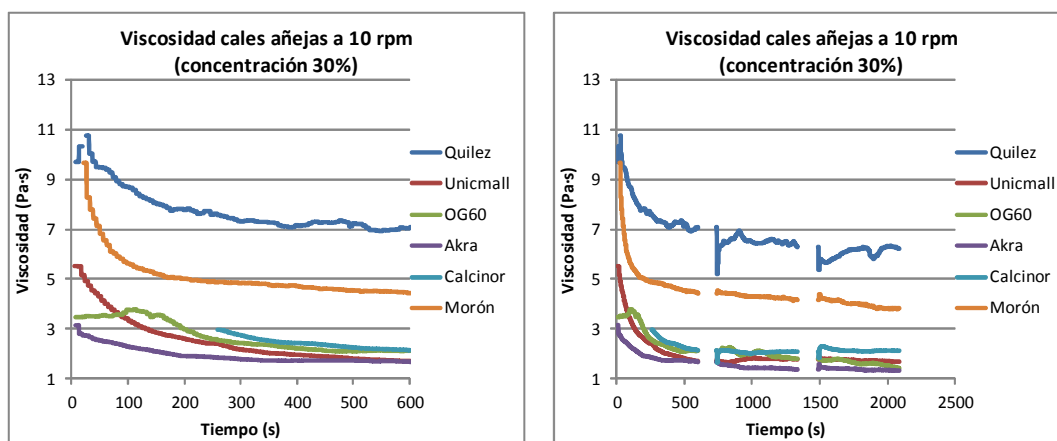


Figura 171 Gráficos correspondientes a la medida de la viscosidad en cales en pasta añejas y pasta de cal antigua (Calcinor), normalizadas a una concentración del 30 %

Viscosidad (Pa·s) cales añejas al 30 %			
	Tiempos de lectura		
	600 seg.	1320 seg.	2040 seg.
Quilez	7,05	6,34	6,24
Moron	4,45	4,17	3,82
Calcinor	2,16	2,09	2,13
Unicmall	1,72	1,79	1,69
OG60	2,13	1,82	1,45
Akra	1,69	1,38	1,34

Tabla 22 Datos correspondientes a la medida de la viscosidad en cales en pasta añejas y pasta de cal antigua (Calcinor Calcasa). Todas las muestras normalizadas a una concentración del 30 %. Cada lectura corresponde a la media de los últimos 12 segundos.

La Figura 171 presenta conjuntamente los resultados de las distintas cales hasta 600 segundos sin interrupción y hasta 2040 segundos con las dos interrupciones. En la Tabla 22 se muestran numéricamente los valores al final de los períodos de aplicación de esfuerzo cortante como consecuencia del promedio de las últimas lecturas.

Es de destacar que las dos cales que muestran valores superiores de viscosidad son Quilez y Morón. La primera de ellas con gran diferencia.

También resulta relevante observar que la pasta de cal (Calcasa-calcinor) presenta valores de viscosidad superiores a otras tres cales en pasta más añejas. Este hecho resulta muy interesante dado que no ocurría así en las concentraciones originales.

La comparación directa entre los resultados a “concentraciones alrededor del 38%” y los resultados a “concentración del 30%” resulta imposible dado que los protocolos de medida son diferentes, especialmente en las medidas previas. En el caso del protocolo A1, los resultados a 10 r.p.m. vienen precedidos de lecturas a velocidades inferiores lo que afecta claramente a la historia de corte.

5.2.1.3 Discusión referente a la viscosidad de las cales añejas

Las diferentes cales añejas estudiadas se pueden analizar de forma comparativa a partir de las viscosidades medidas en concentraciones iguales. Las funciones potenciales ajustadas a los datos obtenidos a $t = 700$ segundos, para las cales en pasta añejas presentan correlaciones (R^2) notables, entre 0.6 y 0.96, a excepción de dos casos, OG24-S3 y OG60-S1, con valores de 0.13 y 0.46, respectivamente.

Estas comparaciones de los modelos ajustados a concentración igual (Figura 167 a Figura 169) permiten observar que cal será más o menos viscosa para cada caso concreto, entendido como la velocidad de corte propia del sistema de manipulación o aplicación. En las citadas figuras se ha reseñado en valor de la viscosidad a una velocidad de 10 rpm, como la correspondiente a una aplicación de técnica de extendido, con una llana por ejemplo.

Análogamente podemos comparar cales entre si con las concentraciones originales, pero se dificulta mucho más la medida en las concentraciones elevadas. En nuestros casos, la cal más viscosa en su concentración original será la S (5.87 Pa.s) seguida de AK (5.46 Pa.s) OG 60 (4.06 Pa.s).

Los resultados de los modelos ajustados a las pastas de cal proporcionan viscosidades considerablemente inferiores que los de las cales en pasta añejas.

En el tipo de modelo ajustado queda manifiesta la importancia del valor del índice de consistencia (k), como indicador principal de la viscosidad, para las cales que se van a plicar a bajas velocidades, en general con procesos artesanales manuales, mientras el valor del índice de flujo (n) toma más relevancia, como indicador de la viscosidad, para las cales que se van a manipular a altas velocidades en procesos mecánicos.

5.2.2 Evolución de la viscosidad en pastas de cal.

Se plantea la necesidad de conocimiento referente a la posible “evolución” de una pasta de cal, realizada a partir de un hidróxido industrial. Se trata de estudiar como “mejora”, en términos de aumento de la viscosidad, una pasta realizada a partir de la mezcla íntima de una cal cálcica apagada en polvo, de origen industrial, como consecuencia, básicamente, del paso del tiempo.

Por una parte algunos fabricantes artesanales de morteros de cal y algunos estucadores opinan que una pasta realizada a partir de un hidróxido no mejora con el tiempo.

Oriol García, parafraseando a sus antepasados dice:

“calç esventada, calç cagada”

Sin embargo, parece que el proceso físico-químico que genera el agua, como molécula polar capaz de laminar los cristales de hábito prismático-exagonal para generar cristales laminares, puede ocurrir de igual manera en las pastas generadas a partir de hidróxido cálcico (55)

A partir de una simple observación se detecta el efecto causado en una pasta de cal por un día de estacionamiento, en lo referente a la tensión de corte umbral y al efecto tixotrópico. La cuestión es si se trata simplemente del efecto de empaquetamiento generado como consecuencia de la sedimentación de la dispersión, o bien si efectivamente existe un efecto de cambio en la reología con el paso del tiempo.

Así pues, se desconoce cómo evoluciona una pasta de cal con el tiempo y no se conoce bibliografía científica al respecto.

5.2.2.1 Planteamiento de la experimentación con pastas de cal

Para estudiar este fenómeno se planteó inicialmente confeccionar en laboratorio pastas de cal a partir de una cal apagada en polvo de origen industrial, Pachs CL90-S, en una concentración del 30 % en agua destilada comercial y medir viscosidades a diferentes edades. Ante los resultados obtenidos se decidió repetir la serie de resultados para la misma cal y para la misma concentración pero introduciendo tiempos de interrupción-espera diferentes.

Finalmente se repitió la sistemática para 4 cales apagadas en polvo de orígenes industriales diferentes.

También se estudió el efecto de una agitación intensa a diferentes revoluciones y tiempos de agitación, por si influía decisivamente en los resultados de variación de viscosidad.

5.2.2.2 Preparación y codificación de muestras

El procedimiento seguido consistió en la mezcla a mano, por mediación de una espátula y en un bote de plástico de 200 cc, de los dos componentes (cal apagada en polvo de origen comercial y agua destilada) dosificados en peso con precisión de 0,01 g, a razón de 70 g de cal y 30 g de agua.

Como ya se ha dicho con anterioridad, la historia de corte interfiere en gran manera los resultados de las mediciones de viscosidad, especialmente de la tensión de corte umbral (τ_0). Con el propósito de eliminar esta variable se procedió a una agitación mecánica a unas 100 r.p.m. durante 5 minutos, aplicada con el equipo que se muestra en la Figura 58. El tiempo de interrupción entre el amasado y el inicio de las lecturas con el viscosímetro fué de 10 minutos.

La dispersión así confeccionada se mantuvo en forma de pasta homogénea después de su agitación y tardó suficiente tiempo en experimentar sedimentación, lo cual permitió medir su viscosidad con pocas interferencias ocasionadas por este fenómeno. El proceso se repitió a diferentes edades, es decir: agitar incorporando el agua que queda en la parte superior una vez se ha producido la sedimentación (1 día, 2, 3, 7, ...) hasta generar una pasta homogénea y medir la viscosidad. Para cada nueva medida se repitió previamente la agitación mecánica descrita anteriormente.

Para la medición de la viscosidad se siguió el protocolo A2 descrito en 4.3.2.4 *Metodología seguida para la medida de la viscosidad*.

Primera serie PACHS CL 90 S

Para estas determinaciones se prepararon pastas de cal en concentraciones del 30 %, con una cal cálcica en polvo, de elevada pureza, de origen comercial (Pachs CL 90 S). La secuencia de lecturas de viscosidad se hizo variando los intervalos de tiempo de reposo para observar el efecto del paso del tiempo. La Tabla 23 resume las distintas series y los tiempos de almacenamiento y lectura. La letra inicial y el número final definen la muestra. El número intermedio corresponde a la edad en días para los distintos tiempos de lectura de viscosidad.

PRIMERA SERIE DE ENSAYOS

CODIFICACIÓN ENSAYOS

MUESTRAS	CODIGO	DIAS						
		0	1	2	3	4	7	300
LMXJVL	A	A01,	A11,	A21,	A31,	A41,	A71,	A3001,
		A02,	A12,	A22,	A32,	A42,	A72,	A3002,
		A03	A13	A23	A33	A43	A73	A3003

DICIEMBRE 2010

Tabla 23 Codificación de muestras para la primera serie de medida de viscosidad

Así, se realizó una serie de ensayos (A) con tres muestras idénticas (1, 2, 3). Se realizaron medidas de viscosidad a 0, 1, 2, 3, 4, 7 y 300 días.

Segunda serie PACHS CL 90 S

A la vista de los resultados de la primera serie, se decidió repetir la experimentación aumentando el número de muestras de cada determinación, pasando de tres a cinco, así como tomando lecturas a 30 y a 90 días.

Al mismo tiempo se decidió realizar distintas series de ensayos con tiempos de lectura no coincidente para detectar el posible efecto del re-amasado en la evolución de la viscosidad.

Así la segunda se basó en pastas de cal realizadas con cal cálcica en polvo, Pachs CL 90 S, en concentraciones del 30 %, exactamente igual a la primera (Tabla 24).

SEGUNDA SERIE DE ENSAYOS								
CODIFICACIÓN ENSAYOS								
MUESTRAS	CODIGO	DIAS						
		0	1	2	3	7	30	90
LMXJL	A	A01 - A05	A11 - A15	A21 - A25	A31 - A35	A71 - A75	A301-A305	A901-A905
LXL	B	B01 - B05		B21 - B25		B71 - B75	B301-B305	B901-B905
LJL	C	C01 - C05			C31 - C35	C71 - C75	C301-C305	C901-C905
LL	D	D01 - D05				D71 - D75	D301-D305	D901-D905

ENERO-ABRIL 2011

Tabla 24 Codificación de muestras para la segunda serie de medida de viscosidad

Se realizaron 4 series (A, B, C, D) con cinco muestras cada una (1, 2, 3, 4, 5).

En la serie A se realizaron medidas de viscosidad a 0, 1, 2, 3, 7, 30 y 90 días. En la serie B las medidas fueron a 0, 2, 7, 30 y 90 días, en la C a 0, 3, 7, 30 y 90 días y, finalmente, para la serie D se midió a 0, 7, 30 y 90 días.

Serie PACHS 80 S, Ciaries 80, Caplansa 80, Tudela Veguin 90

Se decidió estudiar otras pastas de cal generadas en el laboratorio partiendo de otras cales comerciales. El resto de parámetros se mantuvo idéntico respecto de la segunda serie, para lecturas a 0, 1, 3, 7, 30 y 90 días.

Las cales escogidas fueron:

Pachs CL 80 S, al tratarse de un polvo generado a partir de la misma cal viva que Pachs CL 90 S, pero capturado de forma distinta en el proceso de apagado. Se codificó como **P80**.

Ciaries CL 80 S, se trata de otra cal cálcica en polvo comúnmente utilizada en construcción en Cataluña. Proviene de Comercial e Industrial Aries y se codificó como **A80**.

Caplansa CL 80 S, también una cal cálcica procedente de Cales de la Plana, en Chilches (Castellón), del grupo Calcinor. Se codificó como **CP**.

Tudela Veguín CL 90 S, al igual que las anteriores es una cal cálcica pero de mayor pureza, procedente de la planta de Tudela (Asturias), de la empresa Sociedad Anónima Tudela-Veguín, fabricante de cementos, cales, áridos y hormigones. Se codificó como **TV**

Se realizaron 4 series (Tabla 25) correspondientes a los 4 productos industriales de cal en polvo (P80, A80, CP80, TV) con cinco muestras cada una (1, 2, 3, 4, 5).

En las cuatro series se realizaron medidas de viscosidad a 0, 1, 3, 7, 30 y 90 días.

SEGUNDA SERIE DE ENSAYOS							
CODIFICACIÓN ENSAYOS							
MUESTRAS	CODIGO	DIAS					
		0	1	3	7	30	90
Pachs 80	P80	P80-01 a P80-05	P80-11 a P80-15	P80-31 a P80-35	P80-71 a P80-75	P80-301 a P80-305	P80-901 a P80-905
Ciaries 80	A80	A80-01 a A80-05	A80-11 a A80-15	A80-31 a A80-35	A80-71 a A80-75	A80-301 a A80-305	A80-901 a A80-905
Caplansa 80	CP80	CP80-01 a CP80-05	CP80-11 a CP80-15	CP80-31 a CP80-35	CP80-71 a CP80-75	CP80-301 a CP80-	CP80-901 a CP80-
Tudela-Veguín	TV	TV-01 a TV-05	TV-11 a TV-15	TV-31 a TV-35	TV-71 a TV-75	TV-301 a TV-305	TV-901 a TV-905
FEBRERO-MAYO 2011							

Tabla 25 Codificación de muestras para la segunda serie de medida de viscosidad en diferentes cales.

5.2.2.3 Resultados y análisis

5.2.2.3.1 De la primera serie PACHS CL 90 S.

En la Tabla 26 y en la Figura 172, se muestra un resumen de los resultados para cada edad estudiada (0, 1, 2 300) Se expone el valor promedio de las diversas muestras (típicamente 3) así como su dispersión (S).

Días	A	S _A
	Viscosidad (η) Pa·s	Dispersión Pa·s
0	1.06	0.30
1	1.09	0.11
2	1.52	0.04
3	1.62	0.07
4	1.78	0.12
7	1.68	0.16
300	1.88	0.25

Tabla 26 Resumen de resultados de viscosidad correspondientes a la primera serie Pachs CL 90 S.

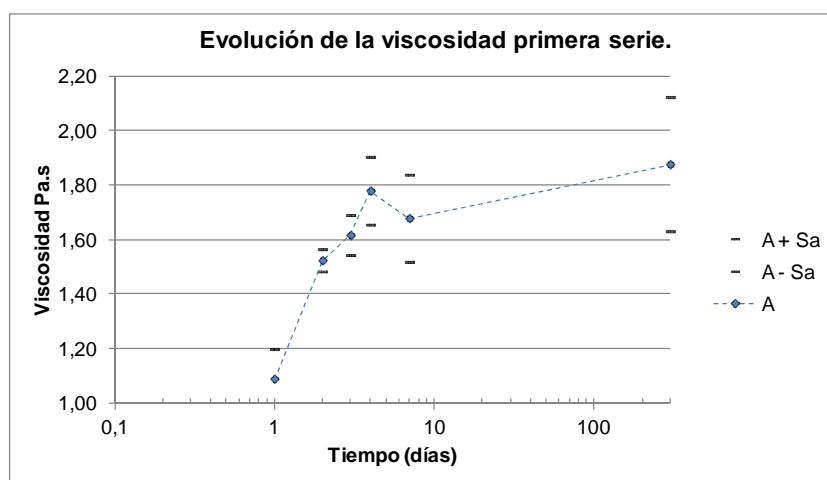
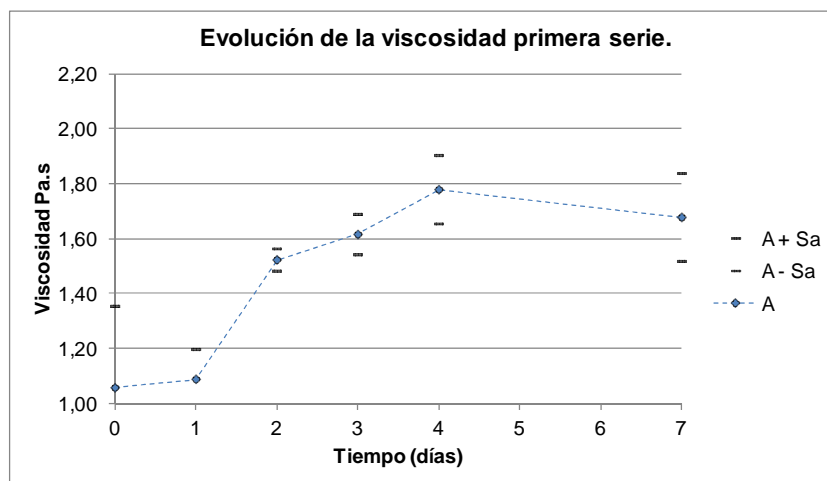


Figura 172 Gráficos resumen de resultados de viscosidad correspondientes a la primera serie Pachs CL 90 S.

Una primera lectura de los resultados obtenidos indica claramente una tendencia, en el sentido de incrementar la viscosidad con el paso del tiempo. También parece que el efecto de incremento de mejora se atenúa con el tiempo.

No parece apropiado plantear análisis más refinados dada la gran dispersión en la medida a 0 días (28,3 % en términos de coeficiente de variación) lo que dificulta considerar incrementos de viscosidad respecto de las lecturas iniciales.

5.2.2.3.2 De la segunda serie PACHS CL 90 S.

En la Tabla 27 y en la Figura 173 Evolución de la viscosidad en los primeros 30 días del grupo A y valores hasta 300 días (escala logarítmica) correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S., se muestra un resumen de los resultados para cada grupo (A, B, C y D) y para cada edad estudiada (0, 1, 2 300). Se expone el valor promedio de las diversas muestras (típicamente 5) así como su dispersión (S).

Grupos de ensayo								
Días	A	S _A	B	S _B	C	S _C	D	S _D
	Viscosidad Pa·s	Dispersión Pa·s	Viscosidad Pa·s	Dispersión Pa·s	Viscosidad Pa·s	Dispersión Pa·s	Viscosidad Pa·s	Dispersión Pa·s
0	1.32	0.10	1.12	0.22	1.18	0.12	1.25	0.17
1	1.37	0.04	-		-		-	
2	1.24	0.05	1.23	0.11	-		-	
3	1.51	0.10	-		1.38	0.14	-	
7	1.62	0.14	1.40	0.10	1.64	0.17	1.42	0.06
30	2.24	0.12	1.75	0.19	1.69	0.22	1.84	0.35
90	2.37	0.28	1.74	0.11	1.82	0.15	1.86	0.16
300	2.48	0.18						

Tabla 27 Resumen de resultados de viscosidad de los grupos A, B, C y D, correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.

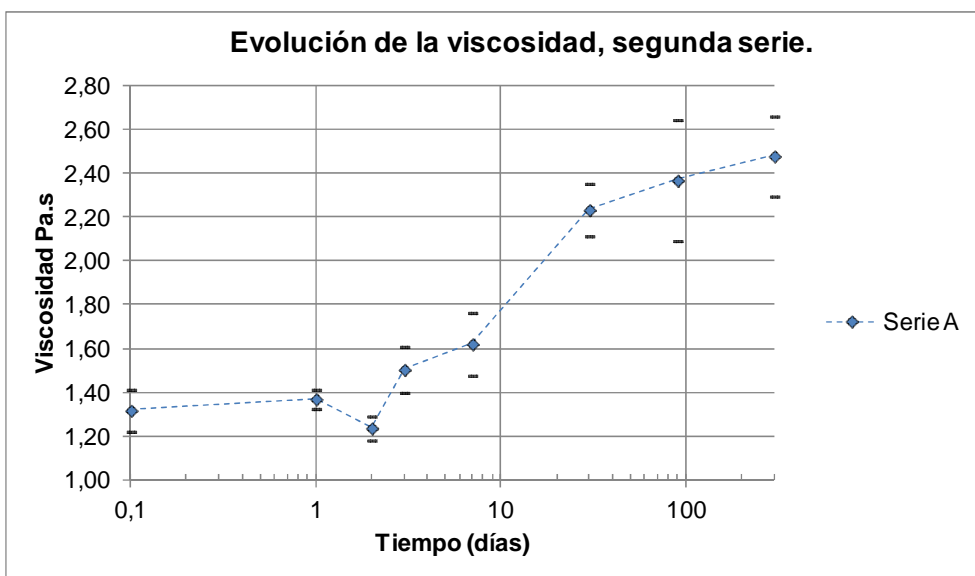
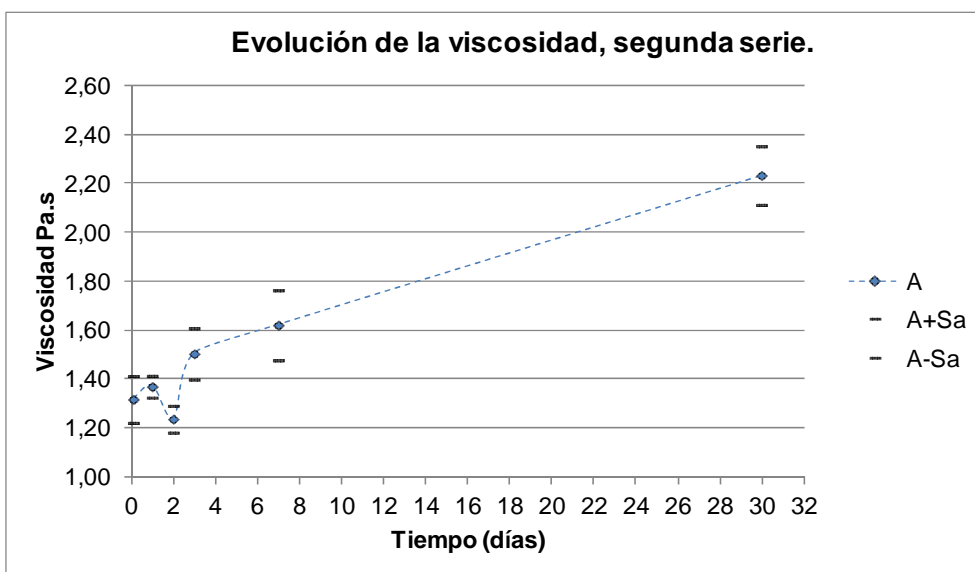


Figura 173 Evolución de la viscosidad en los primeros 30 días del grupo A y valores hasta 300 días (escala logarítmica) correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.

Al igual que en la primera serie, se observa una tendencia al incremento de viscosidad con el paso del tiempo. Este incremento se produce en su mayor parte a edades relativamente temprana (Figura 173).

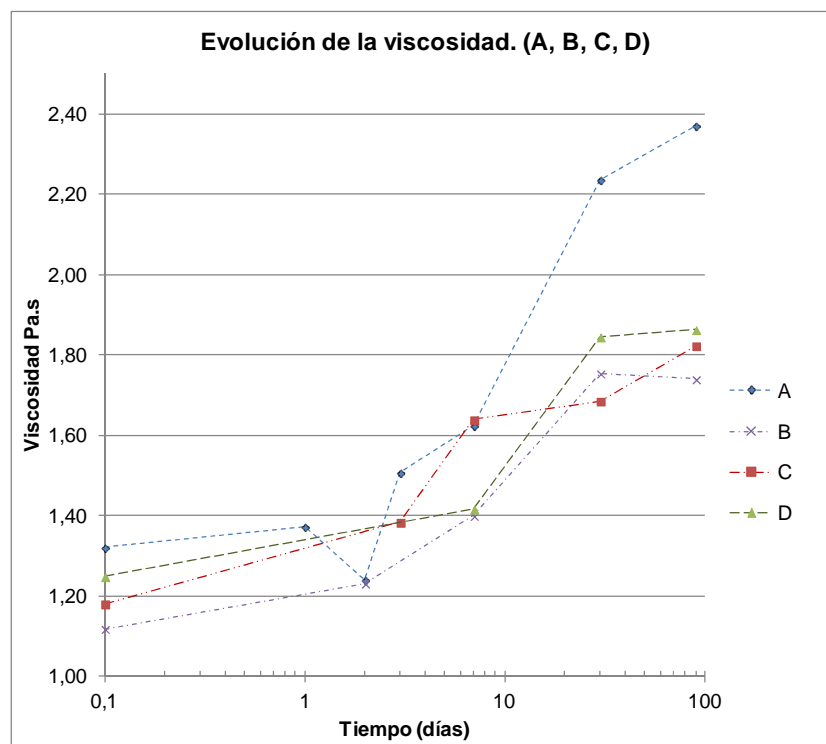


Figura 174 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días (escala logarítmica) de los cuatro grupos (A, B, C y D) correspondiente a la segunda serie Pachs CL 90 S.

Para las cuatro series (Figura 174) la tendencia en la evolución de los resultados fue similar. En todos los casos se produjo un incremento en los valores de viscosidad con el tiempo y las consecuentes reamasadas.

Tiempo	SERIE A		SERIE B		SERIE C		SERIE D		SERIES A, B, C, D	
	η (Pa·s)	$\Delta\eta_{[0:t]}$	η (Pa·s)	$\Delta\eta_{[0:t]}$	η (Pa·s)	$\Delta\eta_{[0:t]}$	η (Pa·s)	$\Delta\eta_{[0:t]}$	Media $\Delta\eta_{[0:t]}$	$S_{\Delta\eta_{[0:t]}}$
0	1,32	0,00	1,12	0,00	1,18	0,00	1,25	0,00		
1	1,37	0,04								
2	1,24	-0,06	1,23	0,10						
3	1,51	0,14			1,38	0,17				
7	1,62	0,23	1,4	0,25	1,64	0,39	1,42	0,14	0,25	0,10
30	2,24	0,70	1,75	0,56	1,69	0,43	1,84	0,47	0,54	0,12
90	2,37	0,80	1,74	0,55	1,82	0,54	1,86	0,49	0,59	0,14
300	2,48	0,88								

Tabla 28 Incrementos de viscosidad de los grupos A, B, C y D, con respecto a la viscosidad en $t = 0$

Definimos el valor de incremento de viscosidad entre un cierto período de tiempo como:

$$\Delta\eta_{[t_0:t]} = - (\eta_t - \eta_{t_i}) / \eta_{t_i}$$

Donde η_t y η_{t_i} son los valores de la viscosidad para dos tiempos de envejecimiento.

En la Tabla 28 se muestran los diferentes valores de incrementos de viscosidades respecto de las lecturas a 0 días. Es de destacar como el constante incremento decrece en forma relativa con el tiempo.

Por ejemplo, el promedio de los incrementos de las cuatro series para los periodos [0:30] y [0:90], es de 0,54 y 0,59 respectivamente. Es decir la mejora de viscosidad entre los 30 y los 90 días es tan sólo del 4% en promedio, variando entre -1% y +8%, según muestra la Tabla 29.

	SERIE A	SERIE B	SERIE C	SERIE D	SERIES A, B, C, D	
$\Delta\eta_{[30:90]}$	0,06	-0,01	0,08	0,01	Media $\Delta\eta_{[30:90]}$	$S_{\Delta\eta_{[30:90]}}$
					0,04	0,04

Tabla 29 Incrementos de viscosidad de los grupos A, B, C y D, entre los 30 y los 90 días.

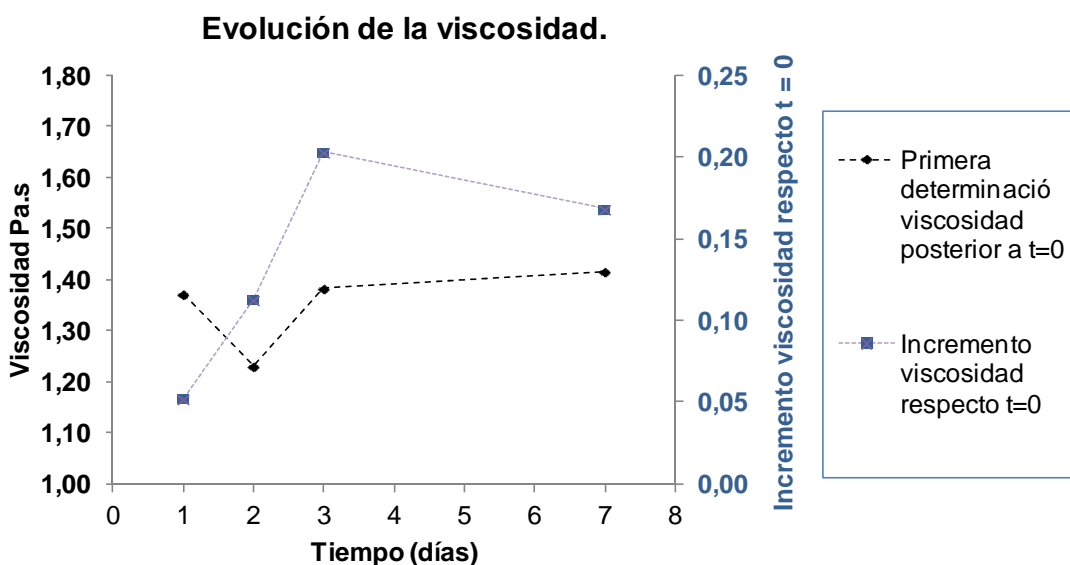


Figura 175 Primeras determinaciones de viscosidad, posteriores a la lectura inicial t=0.

Corresponden a las primeras lecturas de los cuatro grupos (A, B, C y D). Los mismos valores se grafían como incremento respecto de la viscosidad medida en t=0

La Figura 175 muestra los resultados de viscosidad para la primera determinación realizada en cada serie (A, B, C y D) en función de los días transcurridos entre el amasado inicial y dicha medida. El efecto del tiempo transcurrido en el aumento de viscosidad en valor absoluto parece escaso, sin embargo de forma relativa respecto de la determinación de viscosidad a t=0, si parece más relevante.

5.2.2.3.3 De la serie PACHS 80 S, Ciaries 80, Caplansa 80, Tudela Vegin 90

En la Tabla 30 y en la Figura 176 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días de cuatro cales comerciales españolas., se muestra un resumen de los resultados para cada cal estudiada (P, A, CP y TV) y para cada edad estudiada (0, 1, 3, 7, 30 y 90 días). Se expone el valor promedio de las diversas muestras (típicamente 5) así como su dispersión (S).

Días	PACHS 80 S		CIARIES 80 S		CAPLANSA 80 A		TUDELA VEGUIN 90 S	
	P80 Viscosidad Pa·s	S _{P80} Dispersión Pa·s	A80 Viscosidad Pa·s	S _{A80} Dispersión Pa·s	CP Viscosidad Pa·s	S _{CP} Dispersión Pa·s	TV Viscosidad Pa·s	S _{TV} Dispersión Pa·s
0	0.89	0.16	0.87	0.23	0.49	0.14	0.28	0.08
1	0.77	0.03	0.68	0.08	0.41	0.14	0.43	0.21
3	0.84	0.11	0.60	0.08	0.27	0.05	0.32	0.04
7	0.98	0.13	0.67	0.06	0.28	0.07	0.35	0.04
30	1.78	0.18	0.84	0.11	0.59	0.20	0.30	0.02
90	1.73	0.17	1.09	0.17	0.91	0.18	0.43	0.07

Tabla 30 Resumen de resultados de viscosidad de los grupos A, B, C y D, correspondientes a la segunda serie Pachs CL 90 S.

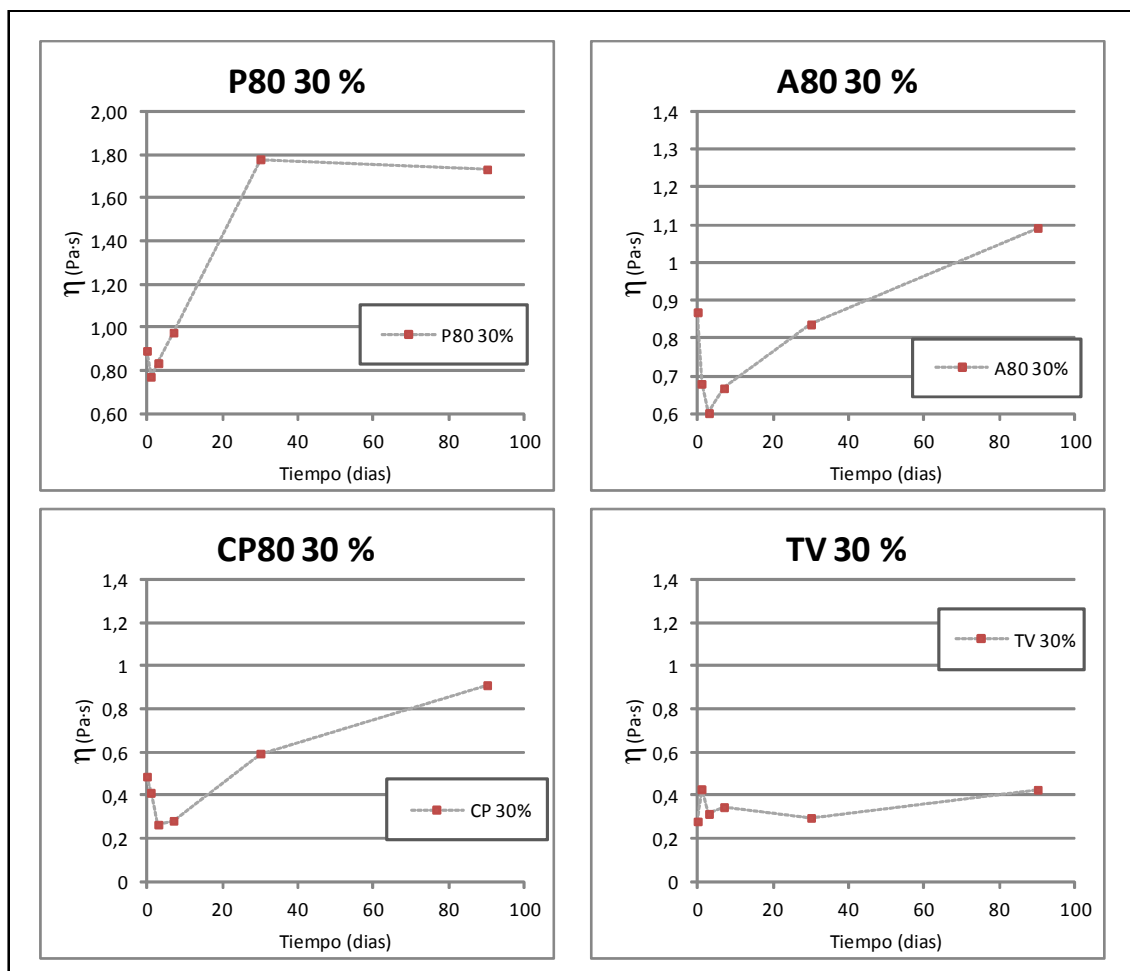


Figura 176 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días de cuatro cales comerciales españolas.

El objetivo de estas medidas no son el estudio de todas y cada una de las diferentes cales, sino una primera observación que permita sospechar si la evolución de la viscosidad en el tiempo es algo inherente a la pasta de cal, independientemente del tipo de cal en polvo de partida.

Como puede observarse en los resultados obtenidos (Figura 176 y Tabla 30) cada una de las cales estudiadas presenta un comportamiento distinto, aunque las diferencias no son demasiado notorias. En cualquier caso, salvo en la cal TV, las otras tres presentan aumentos de viscosidad en el tiempo, después de una etapa inicial de descenso de viscosidad en los primeros días.

Las pastas P80 y las pastas de la segunda serie del apartado anterior (A, B, C y D), provienen de la misma fábrica, si bien las partículas que las forman se obtienen de diferente manera en el proceso de apagado, y la proporción de pureza es algo distinta. De hecho, el comportamiento de ambas muestras es similar, especialmente a edades elevadas (30 y 90 días), como puede observarse en la Figura 177.

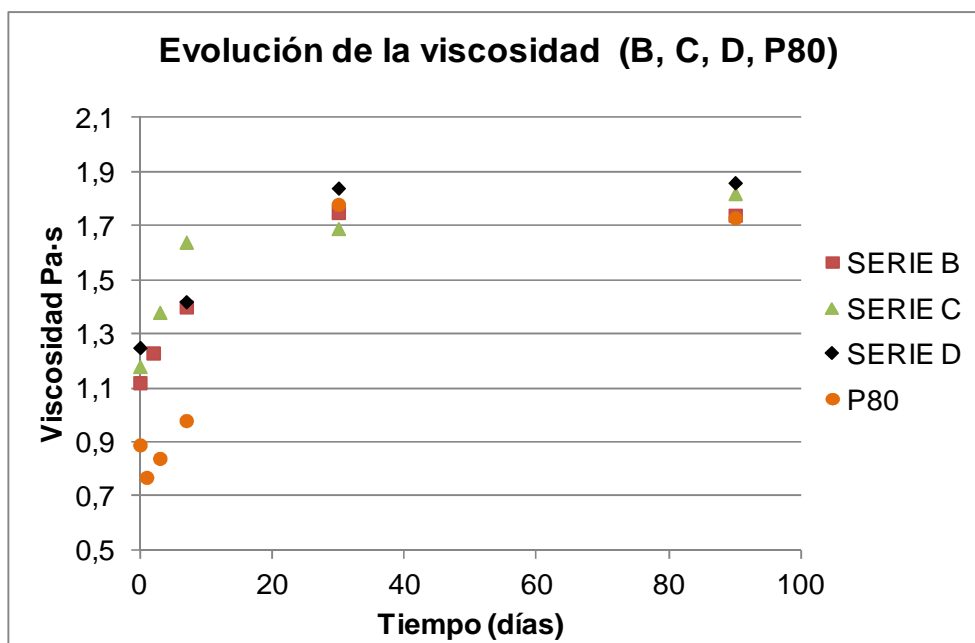


Figura 177 Evolución de la viscosidad en los primeros 90 días de las series B, C, D (Pachs CL 90 S) y la correspondiente a P80 (Pachs CL 80 S).

5.2.3 Determinación empírica del posible efecto en la viscosidad de procesos enérgicos de amasado

Existen algunas referencias al efecto de aumento de viscosidad producido por una larga agitación, muy enérgica, en cales en pasta recién apagadas (46). Concretamente se muestran incrementos en los valores de viscosidad medida (de dos órdenes de magnitud para concentraciones entre el 40% y el 50%) para una cal en pasta recién apagada y agitada durante 15 minutos con turbo-mezclador a altas revoluciones (entre 6000 y 8000 r.p.m.), para distintas concentraciones de la dispersión. Se concluye que este tratamiento provoca una cierta trituración de las partículas, en particular de aquellas que aún no están apagadas o están parcialmente apagadas. Estas roturas aceleran el apagado con el consecuente aumento de superficie específica de las partículas y, por tanto, el aumento de viscosidad.

Con el fin de constatar un posible efecto similar en pastas de cal, se realizó una pequeña campaña de ensayos consistente en medir viscosidades en pastas preparadas al efecto sometidas a amasados muy enérgicos a lo largo de distintos tiempos. Los resultados se comparan entre si y con los de las mismas pastas sometidas a un amasado convencional.

Materiales y métodos

Se prepararon dispersiones de cal hidratada en polvo Pachs CL 90-S, descrita en el apartado 4.2.2 *Cales en polvo*, con una concentración del 30%, siguiendo el procedimiento de amasado descrito en 5.2.2.2 *Preparación y codificación de muestra*.

En total se prepararon 24 muestras, a razón de dos réplicas para cada determinación, por cuatro tiempos (0, 1, 3 y 5 minutos) y por 3 velocidades de re-dispersión. La Tabla 31 muestra la codificación de las muestras.

Sin re-dispersar	Tiempo de re-dispersión			
	rpm	1 minuto	3 minutos	5 minutos
CL 90 (t)(n)	4000	CL 90 (t) 1-4 (n)	CL 90 (t) 3-4 (n)	CL 90 (t) 5-4 (n)
	12000	CL 90 (t) 1-12 (n)	CL 90 (t) 3-12 (n)	CL 90 (t) 5-12 (n)
	20000	CL 90 (t) 1-20 (n)	CL 90 (t) 3-20 (n)	CL 90 (t) 5-20 (n)

t = tiempo de espera anterior a la re-dispersión (0 o 7 días)

n = número de réplica

Tabla 31 Codificación de las muestras preparadas.

Para producir la re-dispersión enérgica se utilizó un equipo dispersor de alto rendimiento (Figura 178), de la marca IKA, modelo T 25 digital ULTRA-TURRAX®, para volúmenes de 1 a 2000 ml y con un rango de velocidades de trabajo de 3.400 – 24.000 rpm. El útil de dispersión utilizado es el S 25 N - 18 G, que permite obtener distribuciones de tamaños de partícula inferiores a 10 µm. Los tiempos y velocidades de re-dispersión quedan definidos en la Tabla 31..



Figura 178 Equipo dispersor de alto rendimiento, de la marca IKA, modelo T 25 digital ULTRA-TURRAX®. El útil de dispersión utilizado es el S 25 N - 18 G.

Una vez producida la re-dispersión y pasados 10 minutos de reposo se procede a la medida de la viscosidad con viscosímetro. Los tiempos de lectura son tres períodos de 10 minutos separados por dos períodos de 2 minutos de espera. La velocidad de aplicación del esfuerzo de corte es constante y de 10 rpm, siguiendo el protocolo A2 (4.3.2.4 Metodología seguida para la medida de la viscosidad)

Del efecto en la viscosidad de procesos energéticos de amasado (rotómetro)

En la Figura 179, la Figura 180 y la Figura 181 se muestran el resumen de los resultados obtenidos en las mediciones de viscosidad posteriores a los diferentes procesos de re-dispersión aplicados, así como a las muestras analizadas sin aplicar re-dispersión.

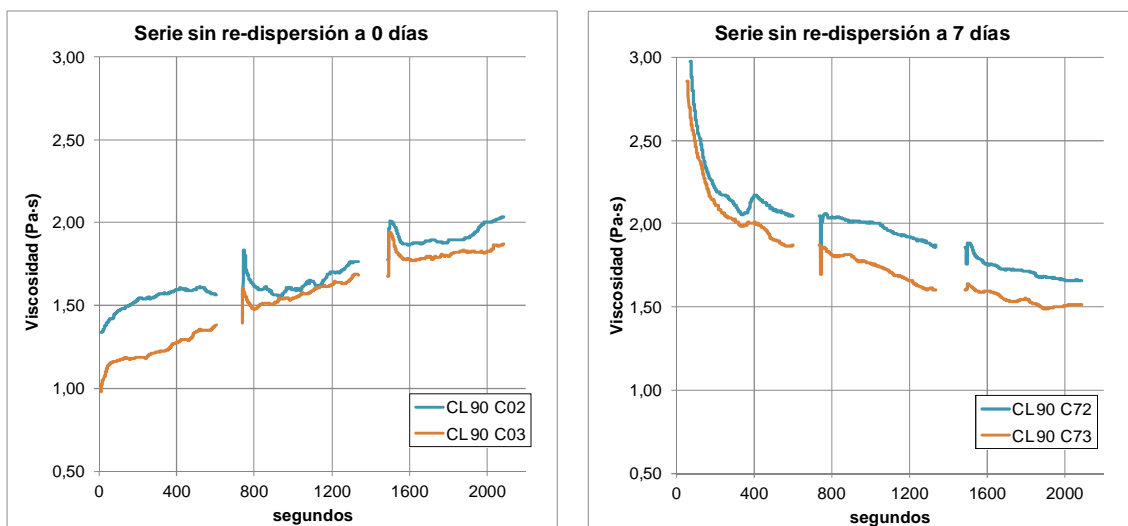


Figura 179 Gráfico de resultados para las pastas de cal sin re-dispersión mecánica a los 0 y 7 días.

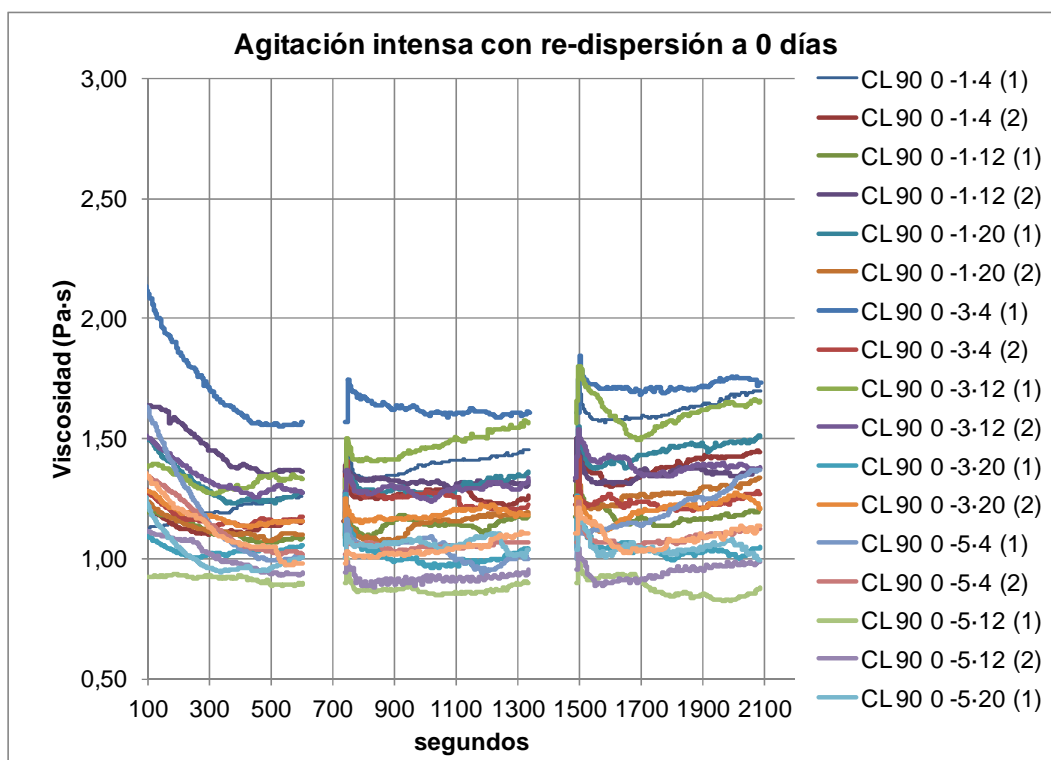


Figura 180 Gráfico de resultados para las pastas de cal aplicando las diferentes velocidades y tiempos de re-dispersión mecánica a los 0 días.

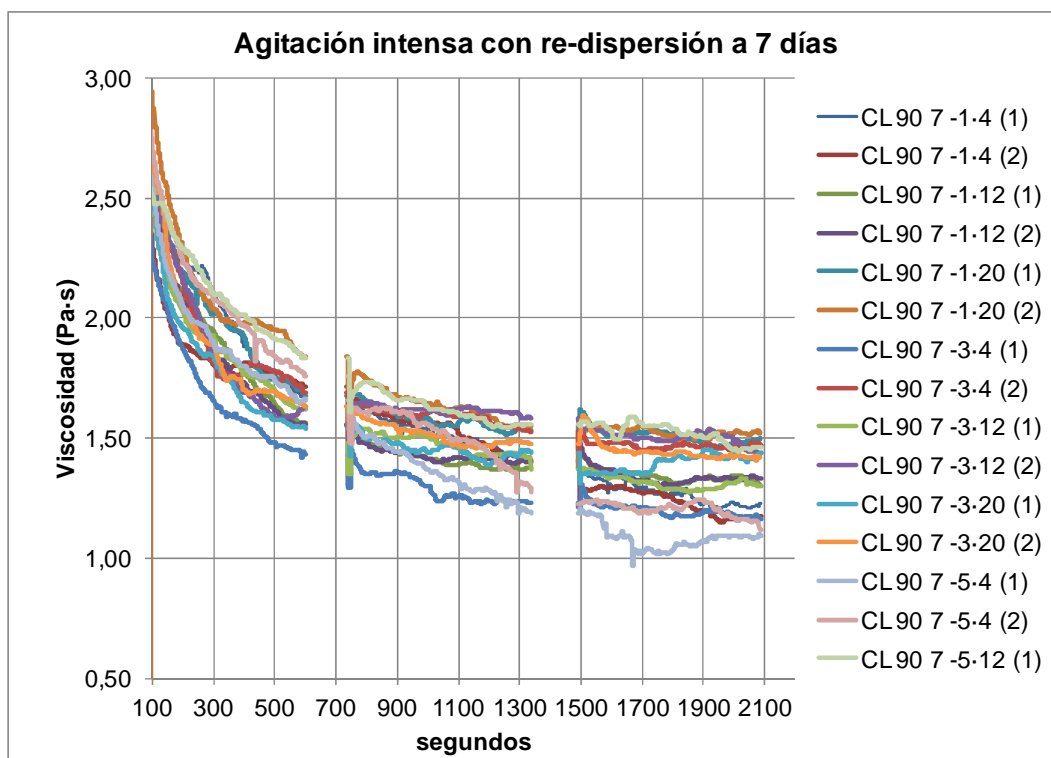


Figura 181 Gráfico de resultados para las pastas de cal aplicando las diferentes velocidades y tiempos de re-dispersión mecánica a los 7 días.

En la Figura 179 se observa exclusivamente el efecto del paso del tiempo en la muestra de pasta de cal que no ha sido sometida a re-dispersión. La lectura inicial a 0 días, se puede asimilar a un modelo constantemente creciente a lo largo del ensayo, (reopexicas), mientras que las lecturas pasados 7 días muestran un comportamiento, a lo largo del tiempo de ensayo, decreciente hasta una aparente asíntota horizontal (tixotrópico).

Se ha buscado ajustar modelos matemáticos a los resultados experimentales. Los mejores ajustes se consiguen con modelos lineales ($\mu = at+b$) y potenciales ($\mu = ct^d$) para los resultados a 0 y a 7 días, respectivamente. Esta modelización ha permitido realizar los promedios de los resultados correspondientes a las distintas réplicas, obteniéndose así unos valores resumen que facilitan las conclusiones (Figura 182).

Para edad 0 de la pasta:

$$\mu = 0.0002t + 1.18$$

Para edad 7 días:

$$\mu = 5t^{-0.15}$$

μ = viscosidad

t = tiempo de ensayo

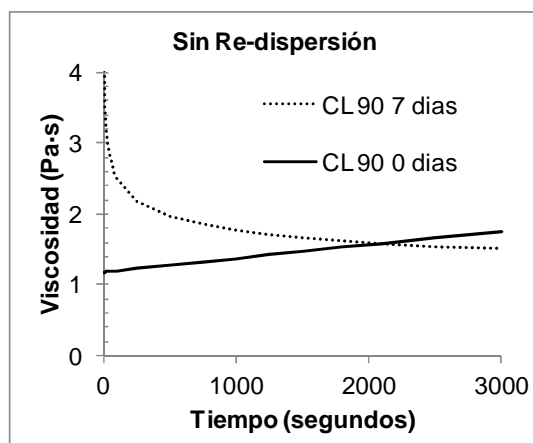


Figura 182 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm.

Como se puede observar en las Figura 179 y Figura 180, donde no se contempla el tiempo de “envejecimiento”, los resultados de la evolución de la viscosidad con el paso del tiempo de medida también presentan una tendencia distinta. Si nos centramos en las muestras a las cuales se les ha aplicado la re-dispersión (Figura 180), los resultados de las viscosidades-tiempo de ensayo para las distintas intensidades y tiempos de re-dispersión, típicamente responden a un primer tramo de valores de viscosidad descendente y a un período de mantenimiento de valores constantes o ligeramente ascendentes. A estos resultados se ajusta un modelo lineal como el realizado en las muestras sin re-dispersión, pero desestimando las lecturas iniciales (200 segundos).

Las muestras a las cuales se les ha vuelto a aplicar idéntico tratamiento de re-dispersión a los 7 días (Figura 181), presentan una tendencia constantemente descendiente con tendencia a la asíntota horizontal de manera muy parecida a las muestras de 7 días de edad pero sin ningún tratamiento de re-dispersión. También para este caso se ajusta un modelo potencial.

En la Tabla 32 y las Figura 183 y Figura 184 se muestran los resultados de los modelos ajustados para cada grupo de velocidades de re-dispersión.

modelo ajustado: $\mu = at+b$ (0 días)				modelo ajustado: $\mu = at^b$ (7 días)			
	CL 90 0 días -1min 4000 rpm	CL 90 0 días -3min 4000 rpm	CL 90 0 días -5min 4000 rpm		CL 90 7 días -1min 4000 rpm	CL 90 7 días -3min 4000 rpm	CL 90 7 días -5min 4000 rpm
a	0,00025	0,00001	0,00010	a	7,47	6,17	7,19
b	1,084	1,245	1,115	b	-0,230	-0,205	-0,215
	CL 90 0 días -1min 12000 rpm	CL 90 0 días -3min 12000 rpm	CL 90 0 días -5min 12000 rpm		CL 90 7 días -1min 12000 rpm	CL 90 7 días -3min 12000 rpm	CL 90 7 días -5min 12000 rpm
a	0,00028	0,00013	0,00002	a	5,52	5,48	5,01
b	1,39	1,255	1,08	b	-0,195	-0,180	-0,170
	CL 90 0 días -1min 20000 rpm	CL 90 0 días -3min 20000 rpm	CL 90 0 días -5min 20000 rpm		CL 90 7 días -1min 20000 rpm	CL 90 7 días -3min 20000 rpm	CL 90 7 días -5min 20000 rpm
a	0,00005	-0,00003	0,00000	a	10,32	5,73	-
b	1,04	0,945	1,02	b	-0,290	-0,165	-

Tabla 32 Resultados de los modelos ajustados para cada grupo de velocidades de re-dispersión

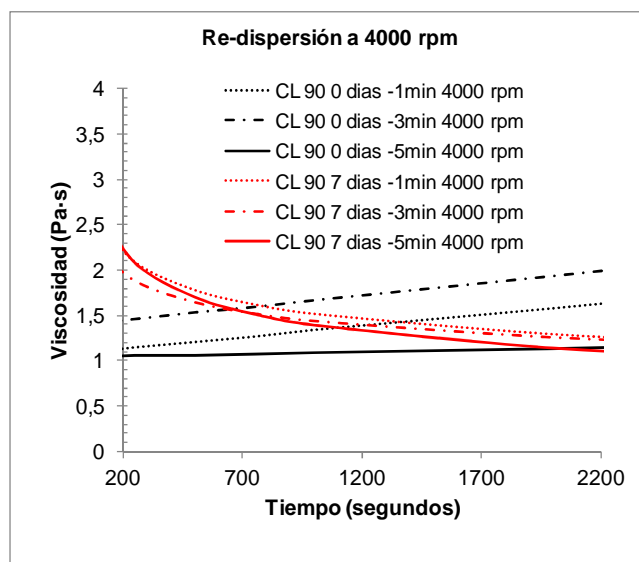


Figura 183 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm, posteriormente a la aplicación de distintos tiempos de re-dispersión a 4000 rpm, a 0 y a 7 días.

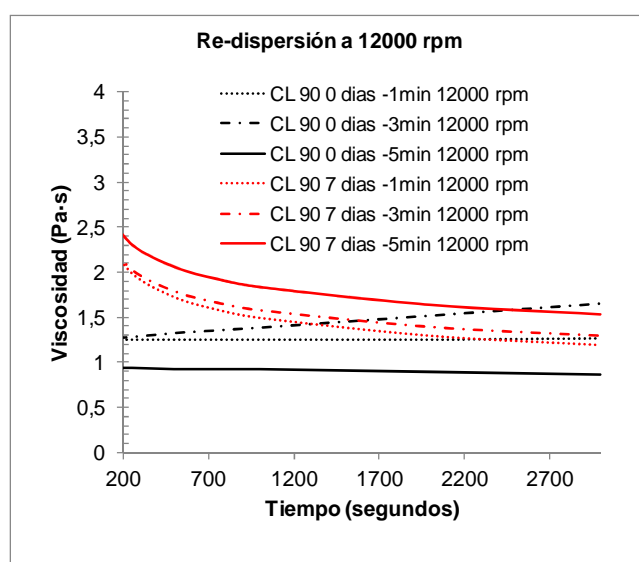


Figura 184 Gráfico de resultados de los promedios de los modelos ajustados para el comportamiento de viscosidad de la cal estudiada a una velocidad de cizalla de 10 rpm, posteriormente a la aplicación de distintos tiempos de re-dispersión a 12000 rpm, a 0 y a 7 días.

En resumen, resulta evidente el efecto de cambio de comportamiento reológico de la pasta de cal como consecuencia simplemente del tiempo de permanencia en agua, mientras que el aumento de viscosidad relacionado con la energía de agitación aplicada (tiempo y velocidad de agitación) parece ser de menor rango. A pesar de ello la agitación aplicada aumenta la viscosidad, especialmente en los primeros minutos de medida, y en mayor medida para agitaciones más intensas.

En cualquier caso los resultados resultan claramente diferentes a los esperados (los reseñados en la bibliografía (46)).

6 Conclusiones

Actualmente el uso de la cal en la arquitectura se limita, casi exclusivamente, a las obras de restauración y rehabilitación. En este tipo de obras intervienen profesionales artesanos que valoran especialmente la trabajabilidad de la cal en estado fresco, y que consideran que una cal en pasta envejecida tradicionalmente ofrece mejores prestaciones que una cal en pasta coetánea o que una cal en polvo. Esta mejor trabajabilidad se traduce en mayor viscosidad, la cual está íntimamente ligada a como son las partículas que componen la dispersión de la pasta.

Seguidamente se exponen las principales conclusiones alcanzadas en relación al comportamiento deformacional y a la evolución de las características granulométricas y cristalinas de las cales en pasta, entendidas como las cales apagadas con exceso de agua y envejecidas, y las pastas de cal, generadas a partir de cal apagada en polvo, así como a las propias herramientas y metodologías de ensayo.

6.1 Referente a las metodologías de caracterización

Nos planteábamos inicialmente la necesidad de constatar la aplicabilidad de tres técnicas analíticas como herramientas de medida de la calidad de la cal de forma complementaria a las herramientas y procesos actualmente normalizados.

Estas herramientas son la DRX a partir de la relación entre intensidades de las dos reflexiones principales del espectro de la portlandita (el parámetro $A_{[0001]}$), la granulometría láser y la medida de la viscosidad a partir de la utilización de un viscosímetro rotacional del tipo Brookfield.

• Parámetro $A_{[0001]}$

El parámetro $A_{[0001]}$ no puede ser un indicador determinante de la antigüedad de las cales en pasta o las pastas de cal. Los resultados obtenidos en las diferentes DRX realizadas a muestras de cales en pasta y pastas de cal de diferentes antigüedades ponen de manifiesto que no se puede establecer una correlación destacable entre los valores de $A_{[0001]}$ y la antigüedad de las cales.

Sin embargo si resulta ser un parámetro válido para asegurar la diferencia entre cales que presenten diferencias significativas en este parámetro, y no puede asegurarse lo contrario. Es decir, supongamos que lo utilizamos como valor de control de origen de diferentes remesas de una misma cal. Si partidas distintas presentan diferentes valores de $A_{[0001]}$, parece razonable asegurar que son distintas. Contrariamente, partidas con parecidos valores de este parámetro pueden proceder de orígenes no coincidentes.

• Granulometría láser

La técnica de la granulometría láser es sobradamente conocida y fácil de utilizar. Los modernos instrumentos permiten mediciones rápidas, repetibles y reproducibles si se fijan las variables propias del sistema de medida (absorción, sensibilidad, modelo de análisis,..) y de preparación de las muestras. En nuestro caso hemos utilizado agua destilada comercial como medio dispersante y se ha forzado la dispersión mediante la aplicación de ultrasonidos.

La distribución granulométrica es un gran indicador de la calidad de una cal. No es fiable la superficie específica, obtenida a partir de la granulometría láser, dado que asume formas esféricas y no tiene en consideración la rugosidad superficial.

• Medida de la Viscosidad

Si bien los reómetros son herramientas de caracterización que permiten medir muy bien el comportamiento reológico y la determinación real del valor de tensión de corte umbral (τ_0), también se pueden utilizar los viscosímetros. Estos no permiten caracterizar con tanta extensión pero son herramientas más difundidas en el control de calidad de fluidos y de coste notablemente inferior.

En este sentido es fundamental definir y pactar un protocolo de medición que haga posible la comparación directa entre distintos productos.

Las cales en pasta y las pastas de cal estudiadas, una vez estabilizada la lectura de viscosidad (para un cierto tiempo de amasado), se pueden modelizar razonablemente bien como un fluido no newtoniano que responde a un modelo Ostwald de Waele cuya expresión es una ley de potencia:

$$\tau = K|\dot{\gamma}|^n$$

Siendo:

K = índice de consistencia

n = índice de flujo

y, por tanto, la viscosidad aparente se modeliza como:

$$\mu_a = K|\dot{\gamma}|^{n-1}$$

La variación de la tensión de corte necesaria para mantener la velocidad de deformación constante, a lo largo del tiempo, se puede modelizar adecuadamente, también, con una ley de potencia del tipo:

$$\mu_a = a \cdot t^b$$

Para valores de $a > 0$ y de $b < 0$

Las cales en pasta y las pastas de cal estudiadas se pueden definir como fluidos pseudoplásticos con comportamiento tixotrópico.

En este caso la calidad de una cal, en lo referente a su reología, vendría definida por los valores del índice de flujo (n) y el índice de consistencia (K).

Para una aplicación común en la arquitectura, como técnica de extendido (revoques, enlucidos y similares), proponemos estandarizar un indicador que permita comparar diferentes materiales. En este caso la propuesta es utilizar el valor de la viscosidad medida en una concentración al 30% a 10 rpm y estabilizada al cabo de 10 minutos de ensayo, expresada en Pa·s.

6.2 De las cales en pasta (CP) y las pastas de cal (PC)

A partir de los diferentes materiales estudiados medidos con técnica de granulometría láser, podemos afirmar que en todos los casos las cales en pasta añejas presentan menores tamaños de partículas que las pastas de cal. Este extremo se muestra en los resultados de distribuciones de tamaños de partículas realizados para los percentiles medios y bajos.

Los tamaños de partícula superiores son consecuencia de un efecto de aglomeración de los cristales para formar “macropartículas” de hasta un orden de magnitud superior para el percentil 95% respecto del 50%, o incluso notablemente mayores (20 a 100

μm) para valores superiores al 95% de la distribución. No podemos afirmar que este efecto de aglomeración se dé en mayor medida en las dispersiones procedentes de pastas de cal añejas que las de cal en pasta. Estas aglomeraciones se han podido observar perfectamente mediante la Microscopía Electrónica (SEM).

Las diferentes cales añejas y pastas de cal estudiadas se han analizado de forma comparativa a partir de las viscosidades medidas y de los modelos potenciales ajustados a los resultados experimentales.

Esta nueva herramienta de comparación, y los resultados de su aplicación, nos permiten afirmar que las pastas de cal, en general, proporcionan viscosidades considerablemente inferiores que las de las cales en pasta añejas.

También nos permiten concluir, de forma coincidente con la bibliografía más actual, que la evolución del proceso de envejecimiento de una cal en pasta no conduce siempre e indefinidamente a resultados “mejores”, entendidos como aumento de la viscosidad; y que las cales en pasta pueden llegar a ser notablemente distintas entre sí, en términos de tamaños de partículas y viscosidad.

6.3 De los apagados con métodos tradicionales y semi-industriales

Se han estudiado básicamente cuatro cales en pasta “jóvenes” en sus apagados tradicionales o semi-industriales correspondientes y se han repetido apagados en laboratorio en condiciones equivalentes para comparar los resultados.

En los cuatro casos estudiados la proporción de cal viva/agua se sitúa en el intervalo 1/3 a 1/4. Sin embargo la manera de añadir la cal al agua (o el agua a la cal), juntamente con la propia reactividad de cada cal viva, proporciona temperaturas de hidratación distintas.

Asimismo cada proceso conlleva un sistema de agitación en la reacción distinto, lo que permite difundir con mayor o menor rapidez la temperatura generada y homogeneizar la concentración de la dispersión. Este factor se pone de manifiesto en los dos distintos apagados realizados con una misma cal viva. En ambos casos (Zone 2 y 3; Unicmall 1 y siguientes) se consiguen menores tamaños de partículas en los procesos que proporcionan mayor agitación a la pasta en sus etapas más iniciales.

En cualquier caso, el método de apagado es una variable que afecta al tamaño de las partículas generadas, especialmente en relaciones agua/cal inferiores a 3, pero no el único. El tipo de piedra y el proceso de cocción también son determinantes.

6.4 De la evolución de las pastas de cal con el tiempo

Inicialmente se planteó la duda respecto de si una pasta de cal evolucionaba con el paso del tiempo de forma similar a como lo hace una cal en pasta. Esta duda proviene de las diferentes informaciones contradictorias recibidas del mundo artesanal por un lado y del mundo más industrial y científico por el otro. Generalizando y simplificando, los primeros mantienen que una pasta de cal no mejora con el tiempo, mientras que

los segundos afirman que sí debe mejorar, en ambos casos entendiendo por mejora el aumento de la viscosidad.

En el presente trabajo queda suficientemente demostrada la evolución de la viscosidad en el tiempo de una pasta de cal realizada en determinadas condiciones y a partir de una cal en polvo industrial concreta. Esta evolución se muestra como un aumento de la viscosidad con el paso del tiempo. Entre los márgenes temporales estudiados, en general hasta 90 días si bien hay casos de hasta un año, se observa como esta evolución se produce más rápidamente en los primeros tiempos para, posteriormente, decrecer la velocidad de aumento de viscosidad.

También queda demostrado que no todas las pastas de cal, realizadas a partir de cales en polvo distintas, evolucionan de igual manera. Entre los casos estudiados (5) se ha dado uno (TV) en el que no se aprecia evolución de viscosidad en los primeros 90 días.

También se han estudiado mediante la granulometría láser, cinco muestras de pasta de cal de distintas antigüedades, procedentes de una cal en polvo de una misma calera. Tal como se ha dicho anteriormente, no se aprecian diferencias cualitativas importantes que nos permitan suponer evoluciones a lo largo del tiempo en el intervalo de 1 a 30 meses.

Inicialmente también se planteó el posible efecto de mejora de la viscosidad a partir de la re-dispersión energética en una pasta de cal joven y se constató dicha mejora, si bien su efecto es de menor orden que el que produce, simplemente, el envejecimiento de la pasta.

A modo de recomendación práctica, para mejorar la trabajabilidad de una pasta realizada con una cal en polvo, resulta conveniente preparar con antelación (una semana, por ejemplo) una pasta y proporcionar una cierta agitación. Este proceder permite que la pasta de cal inicial, de comportamiento reopéxico, pase a tener un comportamiento tixotrópico, aumentando la viscosidad.

7 Bibliografía

1. **Pérez, F. y Rosell, J.R.** *Estudio de características físico-mecánicas en morteros de cal y puzolanas*. Barcelona : Projecte Final de Carrera, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, 2009.
2. **Peñaranda, P. y Rosell, J.R.** *Diferencias y similitudes entre morteros de cal hidráulica y morteros mixtos de cal aérea y cemento pórtland*. Barcelona : Projecte Final de Carrera, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
3. **Puchol, R., Ramírez, J. y Rosell, J.R.** *Desenvolupament de materials en base calç, microsilíce i nanosilíce*. Barcelona : Projecte Final de Carrera, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, 2012.
4. **S., Riera, y otros.** *Análisis comparativo experimental de algunos morteros de restauración*. Barcelona : Projecte de fi de carrera. UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, 2010.
5. **Rosell, J.R. y Navarro, A.** *Sistema mortero para intervenciones patrimoniales. Patente de invención. P 20070143 España, 18 de 05 de 2007.*
6. *Hacia un sistema-mortero para intervención en restauración. Rosell, J.R., y otros.* Barcelona : CAATB, 2007. Rehabimed. 1º Conferencia Regional Euromediterránea. Arquitectura Tradicional Mediterránea. Presente y Futuro. págs. 550-551. ISBN 84-87104-79-7.
7. **Schreiner, T. P.** Aspectos rituales de la producción de cal en Mesoamérica: Evidencias y perspectivas de las Tierras Bajas Mayas. *XVI Simposio de investigaciones arqueológicas en Guatemala*. Guatemala : Meseo Nacional de Arqueología y Etnografía, 2003. págs. 480-487.
8. **Sanz, D.** *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas*. Madrid : Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
9. **Rosell J., Subirats M.A.** *La producció de calç ahir. El procés pre-industrial de producció de calç a la comarca del Montsià*. Barcelona : CAATB, 1987.
10. **Rondelet, J.** *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. París : s.n., 1830.
11. *Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures. A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou.* 14, 2000, Construction and Building Materials, págs. 35-46.
12. *Microscopical study of ancient mortars from Tournai (Belgium). Elsen, J., y otros.* 53, 2004, Materials Characterization, págs. 289– 294.

13. *Study of the pozzolanicity of some bricks and clays.* **Baronio, G. y Binda, L.** 1, 1997, Construction and Building Materials, Vol. 11, págs. 41-46.
14. *Evaluation of Pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin-lime pastes.* **Bakolas, A., y otros.** 1, 2006, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 84, págs. 157–163.
15. *Physico-chemical study of Cretan ancient mortars.* **Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A. y Moropoulou, A.** 33, 2003, Cement and Concrete Research, págs. 651–661.
16. *Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars.* **Biscontin, G., Pellizon Birelli, M. y Zendri, E.** 3, 2002, Journal of Cultural Heritage, págs. 31–37.
17. **The Getty Conservation Institute.** [En línea] [Citado el: 3 de 3 de 2012.] <http://gcibibs.getty.edu/asp/>.
18. **Vicat, L.J.** *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires.* Paris : Chez Goujon, libraire de les AA. RR. Mme la duchesse de Berry et Mme la Duchesse d'Orléans, 1818.
19. *The origin and development of natural cements: The Spanish experience.* **Varas, M. J., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R.** s.l. : Construction and Building Materials, 2007, Vol. 21, págs. 436–445.
20. *La minería del cemento natural de l'àrea metropolitana.* **Falguera, S.** Santa Coloma de Gramanet : Butlletí del Centre d'Estudis de la Natura BN, 2010, Vol. VIII (2), págs. 207-236.
21. **Coloma-Álvarez, G.** *La cal: ¡es un reactivo químico!* Chile : s.n., 2008.
22. **Martin M., García O., Azcónegui F.** *Guía práctica de la cal y el estuco.* Leon : Ed. de los Oficios, 1998.
23. **Bru, A.G. y Briguz, Y.** *Escuela de arquitectura civil: en que se contienen las órdenes de arquitectura, la distribución de los planos de templos, y casas, y el conocimiento de los materiales.* Valencia: J.Th. : s.n., 1738.
24. **Virginia limeworks: making hot lime mortar.** [En línea] [Citado el: 1 de agosto de 2012.] <http://www.youtube.com/watch?v=OtFelaFavIM>.
25. **Rosell, JR. et al.** *Algunas consideraciones sobre la cal y sus morteros.* *Barcelona: UPCommons.* [En línea] 2011. <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/11616/1/Rosell%20Amig%C3%B3.pdf>.
26. **Bríguez y Bu, A.G.:** *Escuela de arquitectura civil.* 1738.
27. **Bails, B.** *Elementos de matemáticas. Tomo IX Arquitectura civil.* Madrid: Ioachin Ibarra : s.n., 1796.
28. **Marcos y Bausá, R.** *Manual del albañil.* Madrid : Tip. de G. Estrada : s.n., 1879.
29. **P., Espinosa.** *Manual de construcción de albañilería.* Madrid : s.n., 1859.

30. **ANCADE, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y derivados de España.** [En línea] [Citado el: 27 de 2 de 2012.] www.ancade.com.
31. **UNESCO.** United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. [En línea] [Citado el: 13 de agosto de 2012.] <http://www.unesco.org/culture/ich/index.php?lg=en&pg=00011&Art18=00511>.
32. **Cales de PACHS.** PACHS. [En línea] [Citado el: 13 de agosto de 2012.] <http://www.calespachs.com/index.asp>.
33. *Lime: a sustainable "green" building lime: a sustainable "green" building product?* **Kenefick, W. y Tate, M.** Orlando, Florida: IBLIS : s.n., 2005. International Building Lime Symposium.
34. **AENOR.** UNE-EN ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Madrid: AENOR : s.n., 2006.
35. **Ap-42 Ch 11: Lime Manufacturing.** EPA. United States Environmental Protection Agency. 2004.
36. *La calce: un materiale antico con un futuro verde e sostenibile.* **Rattazzi, A.** COAC Barcelona : s.n., 2012.
37. **Chaux & Enduits de SaintAstier.** [En línea] [Citado el: 6 de 8 de 2012.] <http://www.c-e-s-a.fr/configurateur/>.
38. *Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction.* **Morel, J.C, y otros.** s.l. : ELSEVIER, 2001, Building and Environment, Vol. 36, págs. 1119-1126.
39. **ICOMOS España.** Asamblea general de ICOMOS 2002. [En línea] [Citado el: 5 de Agosto de 2012.] http://www.esicomos.org/nueva_carpetas/info_DOC_CARTAVENECIA.htm.
40. *Ettringite formation in historic bath brick-lime plasters.* **Hasan Böke, S. A.** 33, 2003, Cement and Concrete Research, págs. 1457–1464.
41. *Thaumasite swelling in historic mortars: field observations and laboratory research.* **Van Hees, R.P.J., Wijffels, T.J. y Van der Klugt, L.J.A.R.** 25, 2003, Cement & Concrete Composites, págs. 1165–1171.
42. *Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento.* **Rosell, J.R. y Rodríguez-Cantalapiedra, I.** 301, 2011, Materiales de Construcción, Vol. 61. doi:10.3989/mc.2010.53509.
43. **ICOMOS España.** Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del Patrimonio Arquitectónico. [En línea] [Citado el: 5 de agosto de 2012.] http://www.esicomos.org/nueva_carpetas/principiosISCARSAHesp.htm.
44. **Casanovas, X.** Atención con los integristas de la cal. II Jornadas FICAL. Barcelona, UPCommons. [En línea] 2011. <http://hdl.handle.net/2009/11617>.

45. **AENOR.** UNE-EN 459-1 Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Madrid : AENOR, 2011.
46. **Rattazzi, A.** *Conosci il grassello di calce? origine, produzione e impiego del grassello di calce in architettura, nell'arte e nel restauro.* Monfalcone : Edicom, 2007.
47. *An overview of lime slaking and factors that affect the process.* **Hassibi, M.** [ed.] 3rd International Sorbalit Symposium. New Orleans: ISS : s.n., 1999. págs. 1-20.
48. Factors affecting lime slaking. *Richmond: Stanco projects ltd.* [En línea] 1997. [Citado el: 2012 de mayo de 2012.] http://www.indachem.com/Documents/Stanco-removed/Literature/Factors_affect._lime_slakingR1%5B1%5D.pdf.
49. **Hassibi, M.** Effect of Slaking water temperatures on quality of lime slurry. *Chemco Systems.* [En línea] 2009. [Citado el: 26 de marzo de 2012.] http://www.chemcosystems.net/Files/Admin/Publications/Effect_of_Slaking_Water_Temperature.pdf.
50. *The kinetics of dissolution of slaked lime.* **Giles, D.E., Ritchie, I.M. y Xu, B.A.** Amsterdam : s.n., 1993, Hydrometallurgy, Vol. 32, págs. 119-128.
51. *UNE-EN-459-2 Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.* **AENOR.** 2002.
52. *A study of the reaction between calcium oxide and water.* **Miller, T.C.** Washington : National Lime Association, 1960.
53. **National Lime Association.** <http://www.lime.org>. [En línea] [Citado el: 26 de marzo de 2012.] http://www.lime.org/documents/lime_basics/lime-physical-chemical.pdf.
54. *An empirical study of factors influencing lime slaking. Part II: Lime constituents and water composition.* **Potgieter, J. H., Potgieter, S.S. y Waal, D de.** 2, 2003, Water SA, Vol. 29.
55. *Calcium hidroxide crystal evolution upon aging of lime putty.* **C., Rodríguez-Navarro, E., Hansen y W.S., Ginell.** 1998, Journal of American Ceramic Society, Vol. 81, págs. 3032-3034.
56. *Microstructure and rehologi of lime Putty.* **E., Ruiz-Agudo y C., Rodríguez-Navarro.** 6, s.l. : Langmuir, 2009, Vol. 26, págs. 3868-3877.
57. *Microstructures evolution of lime putty upon aging.* **G., Mascolo, y otros.** 2010, Journal of Crystal Growth, Vol. 312, págs. 2363-2368.
58. **Portlandite Structure data.** webmineral.com. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 1011.] http://webmineral.com/jpowd/JPX/jpowd.php?target_file=Portlandite_1.jpg.
59. **Hedin, R.** *Plasticity of lime mortars.* Washigton D.C. : National Lime Association, 1962. Azbe Award Nº 3.
60. *Nanoestructure and irreversible colloidal behavior of Ca(OH)₂: Implications in cultural heritage conservation.* **Rodríguez-Navarro, C., y otros.** s.l. : Langmuir, 2005, Vol. 21, págs. 10948-10957.

61. *Lime mortars for the conservation of historic buildings*. **Elern, K., y otros**. 1, 2002, Studies in Conservation, Vol. 47, págs. 62-75.
62. **Perrault, C.** *Compendio de Los diez libros de arquitectura de Vitruvio*. Madrid: Gabriel Ramírez : s.n., 1761.
63. **Alberti, Leon Baptista**. *Los diez libros de arquitectura*. Madrid : Casa de Alonso Gomez impresor de su Magestad, 1582.
64. **Ashurst, J.** Mortars for stone buildings. [ed.] J. Ashurst y F. Dimes. *Conservation of building and decorative stone*. London : Butterworth Heinemann, 1990, Vol. 2, págs. 78-93.
65. *Limes and lime mortars*. **D., Carrington y P., Swallow**. 1996, Journal of architectural conservation, Vol. 1, págs. 7-22.
66. *Calcium hidroxide crystal evolution upon aging of lime putty*. **Rodriguez-Navarro C., Hansen E., Ginell WS**. 11, s.l. : J. American Ceramic Soc., 1998, Vol. 81, págs. 3032-3034.
67. **Cazalla, O.** *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Tesis doctoral, Universidad de Granada : Departamento de Mineralogía y Petrología, 2002.
68. *Ageing of calcium hydroxide crystals: effects on traditional lime mortars carbonation*. **Cazalla, O., y otros**. 2000, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 83, págs. 1070-1076.
69. **E., Hansen, y otros**. Effects of ageing on lime putty. [aut. libro] Groot C. Bartos P. *International Rilem Workshop on historic mortars: characterisation and tests*. Paisley : RILEM, 2000, págs. 197-206.
70. *Proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación agua-conglomerante*. **Arandigoyen, M. y Álvarez, J.I.** 281, 2006, Materiales de construcción, Vol. 56, págs. 5-18.
71. *Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes*. **Cultrone, G., Sebastian, E. y Ortega Huertas, M.** 35, 2005, Cement and Concrete Research , págs. 2278– 2289.
72. *Modelling lime mortar carbonation*. **K., Van Balen y Van Gemert, D.** [ed.] RILEM. 1994, Materials and Structures, Vol. 27, págs. 393-398.
73. *Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature*. **Balen, K. Van.** 35, 2005, Cement and Concrete Research , págs. 647-657.
74. *Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars*. **Rodriguez-Navarro, C., y otros**. 458, Londres : s.n., 2002, Proceedings of the Royal Society a Mathematical, physical & engineering sciences, págs. 2261-2273.
75. **Lawrence, R.M.** A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. s.l. : Tesis doctoral, University of Bath, 2006.
76. **Hendrickx, R.** *The adequate measurement of the workability of masonry mortar*. Leuven (Belgica) : Tesis Doctoral, Katholieke Universiteit Leuven, 2009.

77. *Instruments for measuring plasticity*. **Emley, W.E.** s.l. : American Ceramic Society, 1917, Vol. 19, págs. 523-533.
78. *Measurement of plasticity of mortars and plasters*. **Emley, W.E.** Washington : Technologic Papers of the Bureau of Standards, 1920, Vol. No. 169.
79. **Thomson, R.J. y Godbey, M.L.** Emley Plasticity Testing: The First Steps to a Precision and Bias Statement. [aut. libro] D. Throop y R.E. Klingner. *Symposium on Masonry: Opportunities for the 21st Century*. West Conshohocken, PA, U.S.A. : ASTM STP 1432, American Society for Testing and Materials, 2002.
80. *ASTM C110 - 11 Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone*. West Conshohocken, PA, U.S.A. : ASTM.Society for Testing and Materials, 2011.
81. *Why is type S hydratwed lime special?* **Thomson, A. L.** Orlando, Florida : IBLS International Building Lime Symposium, 2005.
82. *Effect of aging on rheological properties of lime putty*. **Atzeni, C., y otros.** [9], 2004, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 89, págs. 1764-1766.
83. *The rheology of Portland cement paste*. **Tattersall, G.H.** 5, s.l. : British Journal of Applied Physics, 1955, Vol. 6, págs. 165-167.
84. *A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime*. **Sébaïbi, Y., Dheilly, R.M. y Quéneudec, M.** 18, 2004, Construction and buildings materials, págs. 653-660.
85. *Effects of additives on lime putty rheology: applications in the design of mortars for conservation purposes*. **Ruiz-Agudo, E. y Rodriguez-Navarro, C.** Lisboa : HMC08. Historical mortars conference, 2008.
86. *Reología y microestructura de la pasta de cal: implicaciones en el diseño de morteros para la conservación*. **E., Ruiz-Agudo y C., Rodriguez-Navarro.** Sevilla : IX Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación CICOP, 2008.
87. *Differences in the rheological properties of calcitic and dolomitic lime slurries: influence of particle characteristics and practical implications in lime-based mortar manufacturing*. **Arizz, A., y otros.** 306, Madrid : s.n., 2012, Materiales de Construcción, Vol. 62, págs. 231-250.
88. *Measurement protocol for rheological characteritization of lime putty*. **Lassinantti, M., et al.** Cement and Concrete Research. vol. en revisión.
89. *Effect of Aging on Rheological Properties of Lime Putty*. **Cirillo Atzeni, Alessio Farci, Deborah Floris, and Paola Meloni.** s.l. : J. Am. Ceram. Soc., 2004, Vols. 87 [9] 1764–1766 .
90. *Notes on the rheology of lime putties and related mortars*. **C., Atzeni, y otros.** 7, s.l. : ZKG International, 2006, Vol. 59, págs. 81-88.
91. *A rheological fuzzy model for lime plasticity and mortar consistency*. **Atzeni, C., Sanna, U. y Spanu, N.** s.l. : Applied rheology, 2006, Vol. 16 , págs. 80–89.

92. *The rheology of Portland cement paste.* **Trattersall, GT.** s.l. : British Journal Applied Physics, 1955, Vols. 6 165-167.
93. *Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar.* **H., Pavia, y otros.** s.l. : Cement and Concrete Research, 2010, Vol. 40. 447-451.
94. *Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents.* **Pavia, H., y otros.** s.l. : Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, págs. 1141-1146.
95. *Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars.* **Seabra, M.P., y otros.** s.l. : Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, págs. 1147-1153.
96. *Protocollo di misura del comportamento reologico di sospensioni di calce.* **Rattazzi A., et altri.** 2010. Documento en proceso.
97. **Rawle, A.** Malvern Instruments Ltd. [En línea] [Citado el: 30 de octubre de 2012.] <http://www.malvern.com>.
98. *UNE 103101 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.* **AENOR.** Madrid : s.n., 1995 .
99. *UNE 103102 Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.* **AENOR.** Madrid : s.n., 1995.
100. *Estudio comparativo del desarrollo cristalino de la portlandita en función del apagado.* **A., Luque, y otros.** 3, s.l. : Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 2005, págs. 125-126.
101. *Quantitative X-ray diffraction analysis of clay minerals. An evaluation.* **Mellinger, R.M.** 6, s.l. : Canadá: Saskatchewan Research Council,, Vols. G-79, págs. 1-46.
102. *Textural of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface.* **Detwiler, R.J y Monteiro, P.J.M.** s.l. : Cement and Concrete Research, 1988, Vol. 18, págs. 823-829.
103. **Cazalla Vázquez, O.** *Morteros de Cal. Aplicación en el patrimonio histórico.* s.l. : Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Departamento de mineralogía y petrología, 2002.
104. **Forum Italiano della Calce.** [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2012.] <http://www.forumcalce.it/>.
105. *Kinetic study of the hydration of magnesium oxide for a chemical heat pump.* **Kato, Y., y otros.** 11, 1996, Applied Thermal Engineering, Vol. 16, págs. 853-862.
106. **Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. y Aranda Usón, A.** Life cycle assesement of building materials: Comparative analysis of energy and environment impacts and evaluation of eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment.* (2011). Vol. 46, págs. 1133-1140.
107. *Aging of Lime Putty: effects on traditional lime mortar carbonation.* **Cazalla, O., y otros.** 5, 2002, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 83, págs. 1070-1076.

8 Anexos

Anexo 1. Hacia un sistema-mortero para intervención en restauración

Anexo 2. Características reológicas de pastas de cal

Anexo 3. Poster “Características reológicas de pastas de cal”

Anexo 4. ¿Existen diferencias en las cales apagadas por distintos métodos tradicionales?: la experiencia de Zone (BS)

Anexo 5 Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento

Anexo 6 Algunas consideraciones sobre la cal y sus morteros

Anexo 7 El forn de raig

Anexo 8. Cuestiones de nomenclatura

Anexo 9. Grout puzolánico de altas prestaciones

Anexo 1. Hacia un sistema-mortero para intervención en restauración.

Presentado: Salón CONSTRUMAT 07, Jornada Técnica; Asociación Nacional de fabricantes de Cal y Derivados (ANCADE)
Rehabimed. 1º Conferencia Regional Euromediterránea. Arquitectura Tradicional Mediterránea. Presente y Futuro; Barcelona; 2007.

Publicado: Rehabimed. 1º Conferencia Regional Euromediterránea. Arquitectura Tradicional Mediterránea. Presente y Futuro; ISBN 84-87104-79-7; CAATB; Barcelona; 2007

Hacia un sistema-mortero para intervención en restauración

Joan Ramon Rosell*, Jaume* Avellaneda,
Servando**Chinchón, Judith*Ramírez

* UPC Universitat Politècnica de Catalunya

** Universitat d'Alacant

E-mail:

joan.ramon.rosell@upc.edu Telephone:

1 Introducción

Desde siempre el conglomerante universal ha sido la cal, hasta la aparición del cemento portland. El cemento portland y los cementos en general son la consecuencia de la evolución en una determinada dirección tecnológica de la producción de la cal.

Resulta muy interesante viajar por los textos clásicos (los "tratados de construcción") para constatar que, con el paso de los siglos, el discurso no ha variado substancialmente en lo referente a la cal. Las instrucciones "vitruvianas" se repiten aconsejando un producto a partir de la piedras lo más puras posible [1].

Sin embargo, las técnicas de producción preindustrial de cal no permiten asegurar un producto de máxima pureza en óxido de calcio [2]. Debemos pensar que casi nunca se conseguía un producto exento completamente de propiedades hidráulicas y de elementos no calcinados. La naturaleza de las materias primas disponibles cercanas a las obras, la dificultad en el transporte, la heterogeneidad en la distribución de la temperatura en el horno, etc. necesariamente son causas de una producción de baja pureza en CaO libre.

El largo proceso de apagado por inmersión en balsa generaba un producto compuesto por hidróxido cálcico y carga mineral inerte. Otras formas de apagado con menor cantidad de agua, materias primas con mayores contenidos de arcillas y superiores temperaturas de cocción proporcionaban productos de cal con propiedades hidráulicas que actualmente conocemos como cales hidráulicas naturales.

El conglomerante con propiedades hidráulicas es aquel que comporta en sí mismo elementos capaces de reaccionar entre sí en presencia de agua para formar nuevos compuestos resistentes. Así pues, existe una cierta continuidad desde las cales aéreas puras a los conglomerantes modernos con fraguados mayoritariamente hidráulicos.

El conocimiento "clásico" ya distinguía entre diversas utilidades de los morteros de cal, donde eran necesarias determinadas prestaciones. Realmente, aquello que se convertía en un producto con propiedades de resistencia inicial elevada, o con capacidad de fraguado en ambientes saturados, etc., era el propio mortero. Estas propiedades se conseguían a partir de dosificaciones con materiales con puzolanidad latente, como puzolanas naturales o chamota.

Las modernas técnicas instrumentales de análisis de materiales [3] han permitido constatar en multitud de edificios patrimoniales la realidad de los morteros históricos realizados con materiales de actividad puzolánica.

Otra cuestión es ¿con que morteros intervenimos actualmente en estas obras?

La cotidianidad de las obras de restauración [4] nos muestra una realidad muy preocupante. La industria del cemento y las preferencias de los operarios han ido arrinconando el uso de la cal, por muy diversas causas. La cultura actual de las obras (y de los proyectos) es la del cemento y el hormigón.

Si en una determinada obra de restauración se prescribe el uso de cal como conglomerante, se puede conseguir realmente, como mal menor, la confección de un mortero bastardo de cal y cemento. Aunque seguramente sería más correcto definirlo como un mortero de cemento adicionado con cal cálcica, dadas las proporciones de ambos conglomerantes.

Incluso determinados morteros industrializados, comercializados como "morteros de cal", son realmente morteros mixtos cemento-cal con proporciones en peso 2 a 1, respectivamente.

No es ahora el momento de relatar pormenorizadamente los distintos problemas que comporta el uso de cemento portland en estas obras [5].

Resumidamente:

- Incompatibilidad con otros materiales presentes en la obra, con la consiguiente formación de nuevos compuestos, generalmente expansivos.
- Formación de sales solubles que generan eflorescencias o criptoeflorescencias.
- Aumento del módulo de deformación del mortero con los consecuentes cambios de rigidez de partes del monumento.
- Cambios de permeabilidad al vapor en la red porosa, etc.

2 Planteamiento

Entroncando con la tradición de los morteros romanos, de los medievales y los posteriores hasta los de cal hidráulica, se plantea desarrollar nuevos morteros de cal con capacidades puzolánicas (controlando estas características) a partir de productos específicos, de alta pureza y constancia, concebidos como un mortero para obras de restauración.

Justamente por el hecho de tratarse de este tipo de obras se puede pensar de manera algo distinta a las obras nuevas, dadas las siguientes características:

- El período de estudio del objeto arquitectónico es más largo y pluridisciplinar. En particular, generalmente, se identificarán los materiales presentes y los procesos patológicos existentes, lo que posibilitará definir condiciones generales para los "nuevos" materiales.
- Las empresas constructoras serán especialistas. Por tanto, con experiencia en este tipo de obras y disponiendo de mano de obra cualificada en los distintos oficios.
- Los períodos de ejecución serán, generalmente, más dilatados y el presupuesto se regirá por parámetros distintos a los de la obra

nueva.

- En muchos casos, el uso (simultáneo, parcial,...) del monumento condicionará el proceso.

Así, es posible plantear para cada caso la utilización de un mortero determinado considerando distintos parámetros de diseño del material como:

- compatibilidad con otros materiales existentes
- rigidizaciones de los elementos constructivos o de la estructura en general
- prestaciones mecánicas demandadas a corto, medio y largo plazo
- funciones de protección respecto de otros materiales, o de sacrificio
- aspecto final de la intervención a corto, medio y largo plazo,
- ambiente en que se encuentra el monumento, período en el que se desarrolla la obra, medios disponibles y tiempos de utilización de estos, etc.

En la medida de lo posible, se persigue desarrollar una cierta base común para todos estos morteros que de por sí resuelva un buen número de situaciones, o bien que facilite el desarrollo de morteros específicos para determinados casos.

3 Propuesta

Se piensa en un producto a medio camino entre el producto industrial y el artesanal, es decir, un mortero moderno preparado industrialmente, pero con una parte de la dosificación que deberá finalizarse en la obra. Aquella que resulta más determinante en el **aspecto** final, es decir, el árido de mayor tamaño y el colorante.

Se parte del conglomerante generalmente aceptado para estas obras, la cal aérea, por razones de compatibilidad[6].

Se cuanta también con elementos capaces de incorporar al sistema sílice reactiva para desarrollar funciones puzolánicas y, conseguir mayores resistencias mecánicas y rigideces iniciales. Pensamos en elementos de tamaño de partícula muy pequeño, de gran superficie específica (hasta 100 m²/g.)[7,8,9].

La utilización de tantas partículas pequeñas comporta una gran demanda de agua y, por tanto, condiciona la retracción en el proceso de secado. Será necesario incorporar un aditivo reductor de agua.

También debemos considerar las funciones diversas que desarrollan los áridos en los morteros[10]:

- Intervienen decisivamente en la reología del mortero.
- Condicionan la porosidad del material.
- Colaboran en el proceso de germinación de los primeros cristales del conglomerante (germinación).

De todo el conjunto de la curva granulométrica, la parte más relevante en los aspectos anteriores es la de las partículas menores (< 200 µm), por tanto, deberá conllevar una cierta curva de finos.

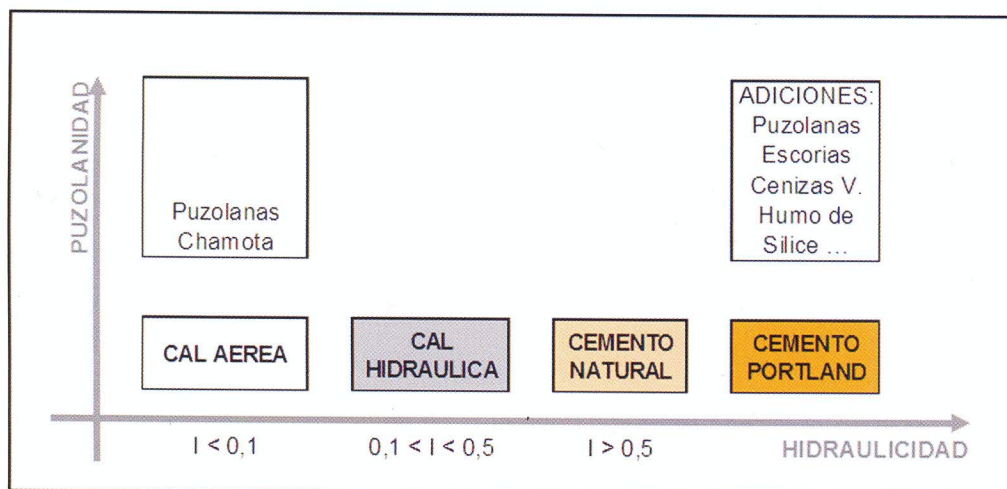
La parte de áridos de mayor tamaño se incorporará en obra y condicionará el aspecto del mortero. Estos deberán ser "limpios" de elementos potencialmente nocivos para el monumento, es decir, lavados bajo agua y tamizados por 200 µm, despreciando la parte que pasa.

Los colorantes minerales para conseguir el color deseado, y naturalmente, el agua "que pida".

Finalmente, en tanto que el mortero es un elemento de unión o de revestimiento, puede resultar un magnífico testigo, aparentemente invisible, de datación de las intervenciones. El sistema-mortero que se propone conlleva un elemento inerte cuya única función es la de trazador imborrable de la intervención.

REFERENCIAS

- [1] ALBERTI, LEÓN BAPTISTA.; Los Diez Libros de Architectura de Leon Baptista Alberti; Traduzidos del Latin en Romance. [por Francisco Lozano] Madrid: Casa de Alfonso Gomez, 1582. (Ed. facs. C olegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1975)
- [2] ROSELL, J.; La producció de calç ahir. El procés pre-industrial de producció de calç a la comarca del Montsià. CAATB, Barcelona 1987.
- [3] MOROPOULOU, A. BAKOLAS, A. BISBIKOU, K.; Physico - chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures. Construction and Building Materials; 14 (2000)
- [4] "Restauración: acción o efecto de reparar o volver a poner un edificio, un monumento, en el buen estado que antes tenía" González Moreno-Navarro, Antonio, en: La masia catalana. Evolució, arquitectura i restauració. Ed Brau. 2005 Figueres (España).
- [5] CAZALLA VÁZQUEZ, OLGA.; Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico; Tesis presentada Universidad de Granada; 2003
- [6] TUFANI, A.; "Le malte nel restauro. Studi, ricerche e operatività"; Ediert; 1987 Perugia.
- [7] A. MOROPOULOU, A. ÇAKMAK, K.C. LABROPOULOS, R. VAN GRIEKEN, K. TORFS. "Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars" Cem. Concr. Res., 34, 1-6 (2004).
- [8] E. ZENDRI, V. LUCCHINI, G. BISCONTIN AND Z.M. MORABITO. "Interaction between clay and lime in "cocciopesto" mortars: a study by Si-29 MAS spectroscopy," Appl. Clay. Sci., 25, 1-7 (2004).
- [9] G. BARONIO AND L. BINDA. "Study of the pozzolanicity of some bricks and clays," Constr. Build. Mater., 11, 41-6 (1997).
- [10] M. STEFANIDOU AND I. PAPAYIANNI. "The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars," Cem. Concr. Compos., 27, 914-9 (2005).



SISTEMA MORTERO

Componentes dosificacos industrialmente

Cal aérea	Sílice reactiva		Aridos < 0,2 mm.	Aditivos
	React Rápida	React Lenta		
Cal cálcica CL-90	Metakaolín Humo de Sílice	Puzolana Natural Chamota Diatomeas	Granulometría controlada, secos, de forma adecuada....	Reologia Sistema poroso

Componentes dosificados en obra

Aridos > 0,2 mm.	Colorante	Agua
Condicionados por el aspecto buscado en el monumento		Condicionada por la técnica de aplicación

Anexo 2. Características reológicas de pastas de cal

Presentado: Congreso Nacional: II Jornadas de investigación en Construcción;
Instituto Eduardo Torroja; Madrid; 2008.

Publicado: En el libro de ponencias del congreso se publicó el resumen (en papel) y
el texto completo en soporte digital.

Características reológicas de pastas de cal

Rosell, J.R.^{1*}; Chinchón, S.²; Haurie, L.¹; Navarro, A.¹; Rodríguez, I.¹

¹ Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. UPC. España

² Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Alicante. España

(*) joan.ramon.rosell@upc.edu

Resumen

Este trabajo presenta las características reológicas de pastas de cal, especificando la influencia de su origen en la obtención de valores de trabajabilidad. El estudio se realiza sobre pastas de cal hidratada, de diferentes edades de maduración y sobre pastas procedentes de cal en polvo. En la práctica artesanal del uso de estos tipos de pasta de cal en obra, la diferencia de trabajabilidad es conocida, lo que comporta distintos rendimientos en la ejecución del revestimiento.

En este estudio se presentan los primeros resultados obtenidos en cuanto a: tamaño de grano (granulometría láser); estructura cristalina (difracción de rayos X y microscopía electrónica); trabajabilidad (viscosidad plástica, índice de flujo, índice de trabajabilidad) dependiendo de la cantidad de agua añadida y de la capacidad de retención de ésta en cada pasta.

Introducción

La cal ha sido el conglomerante universal a lo largo de la historia de la construcción hasta la aparición industrial del cemento. En el siglo XX se ha producido la generalización del uso del cemento en España hasta dejar a la cal un papel casi anecdótico. En los países de nuestro entorno el proceso ha sido similar si bien la presencia de la cal, y en particular de la cal hidráulica, es algo mayor.

Sin embargo, esa paulatina desaparición de un material y del oficio asociado a él, es coincidente en el tiempo con la industrialización de la producción de la cal, con similar tecnología a la de la industria del cemento, produciéndose hoy en día materiales de muy alta pureza, y lo que es más importante, de características constantes.

La restauración y conservación de los monumentos históricos ha producido un creciente interés por los morteros y las pastas de cal, máxime si consideramos los distintos problemas acaecidos en diferentes intervenciones realizadas utilizando como conglomerantes los cementos.

Este “renacer” del uso de la cal conlleva la discusión de que tipo de cal debe usarse. En algunas zonas la discusión se centra en la cal hidráulica frente al mortero mixto de cal aérea y cemento portland, en otras se postula por el mortero de cal aérea y las puzolanas como elemento hidráulico.

Otro frente abierto en la discusión está en la **cal en pasta**, producida de forma tradicional, frente a la **pasta de cal** a partir de cal aérea en polvo mezclada con agua [Rattazzi 2007].

Desde un punto de vista químico, se trata de partículas de hidróxido cálcico y agua. El tamaño de las partículas y su superficie específica (entre otros factores) son relevantes para su reactividad con el CO₂ ambiental, para las diferentes características mecánicas conseguidas, para las propiedades vinculadas a la porosidad, etc.

Desde el punto de vista físico, se trata de dispersiones de partículas de hidróxido cálcico en agua y por tanto se pueden caracterizar desde el punto de vista reológico.

Las reglas generales de producción de cal tradicional eran bien conocidas por los romanos. Estas postulaban la elección de las materias a cocer de entre las más blancas y puras, y la necesaria maduración de la pasta de cal a lo largo de varios meses o incluso años. Plinio el Viejo [G. Plinio Secondo] aseguraba que ésta debía madurar al menos 3 años para que tuviera

buenas uniones. Leon Battista Alberti [Alberti s. XV] loaba las excelencias de una cal con 5 siglos de envejecimiento.

Una de las mejores propiedades de estas pastas es su excelente trabajabilidad y plasticidad. Esta depende en gran medida del tamaño y la forma de las partículas de hidróxido cálcico dispersas, las cuales están influenciadas por el proceso de maduración de las pastas. Con el tiempo, se produce la lenta transformación de cristales prismáticos a cristales tabulares de mucho menor tamaño, con lo que se consigue un aumento de la superficie específica y de la viscosidad [Rodríguez- Navarro 1998].

Este trabajo presenta algunas de las características reológicas de pastas de cal, partiendo de materiales de origen y edades distintas, en línea similar a otros trabajos anteriores [Atzeni 2004].

Objetivos

Este trabajo pretende establecer metodologías encaminadas a caracterizar reológicamente las **cales en pasta** obtenidas mediante la hidratación de la cal viva (CaO) y posteriormente dejada envejecer y las **pastas de cal** obtenidas añadiendo agua a la cal hidratada (Ca(OH)₂) en polvo.

Para ello se han realizado los siguientes ensayos para tres tipos de pasta:

1. Estudiar las características reológicas de las pastas de cal.
2. Analizar la influencia de la humedad y el contenido de (Ca(OH)₂).
3. Obtener modelos matemáticos generalizados que permitan la determinación de la viscosidad en función de la humedad y el contenido de cal hidratada.
4. Microscopia electrónica
5. Análisis granulométrico
6. Difractometría de rayos X y análisis termogravimétricos

Fundamentos teóricos

- Ley de Newton de la viscosidad

Los líquidos puros y homogéneos de bajo peso molecular así como los gases, se comportan de acuerdo con la ley de Newton, la cual viene representada, en coordenadas rectangulares, por la siguiente expresión:

$$\tau = -\mu \frac{dV}{dy} \quad (1)$$

es decir, el esfuerzo cortante a que se somete un fluido, es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local, y esta constante de proporcionalidad es conocida por viscosidad. Los fluidos que cumplen esta ley se denominan por lo tanto, fluidos newtonianos; de acuerdo con esta ley, al representar gráficamente el esfuerzo cortante versus el gradiente de velocidad, para un fluido determinado, debe obtenerse una línea recta que pasa por el origen de coordenadas y cuya pendiente a una cierta temperatura y presión, es la viscosidad del fluido. Sin embargo, existen muchos materiales de importancia industrial que no se comportan de acuerdo con la ley de Newton y son llamados, por lo tanto, fluidos no-newtonianos. Para estos materiales el comportamiento de los esfuerzos cortantes a diferentes gradientes de velocidad, puede establecerse mediante una fórmula generalizada:

$$\tau = -\mu_a \frac{dV}{dy} \quad (2)$$

en la que μ_a es denominada viscosidad aparente, y puede expresarse como una función del gradiente de velocidad o del esfuerzo cortante, indistintamente, y puede aumentar o disminuir con el incremento del gradiente de velocidad.

La viscosidad aparente se define de acuerdo con la ecuación (2)

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

donde:

$$\dot{\gamma}_a = -\frac{dV}{dy}$$

- Modelos matemáticos más utilizados para fluidos no-newtonianos

La curva de flujo de los fluidos no-newtonianos no es lineal, y si es lineal no pasa por el origen de coordenadas. Los modelos matemáticos describen la relación que existe entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo cortante; de estos modelos, los más utilizados entre otros son: el modelo de Ostwald de Waele para fluidos pseudoplásticos, el de los plásticos Bingham o Casson, el de Herschel-Bulkley y otros.

El modelo de ley de potencia de Ostwald-de-Waele puede modelar fluidos pseudoplásticos cuando el exponente, que caracteriza la ley, es menor que uno. Algunos ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: pinturas, gomas, sangre, suspensiones, etcétera. Esta ley modela los fluidos newtonianos cuando n es igual a uno, y cuando n es mayor que uno, representa a fluidos dilatantes. Como ejemplos de estos fluidos, se pueden citar, entre otros, el azúcar, tierra húmeda, suspensiones de almidón de maíz o de arroz.

Teniendo en cuenta que las pastas de cal se ajustan convenientemente al modelo de Ostwald de Waele, sólo haremos énfasis en las características de los fluidos que se ajustan a dicho modelo.

Este modelo viene expresado por la relación:

$$\tau = K|\dot{\gamma}|^n \quad (4)$$

Esta expresión se conoce también como ley de Potencia. En este modelo K es denominado índice de consistencia y n índice de flujo e indica cómo se aleja de un fluido newtoniano. Para los fluidos que se ajustan a este modelo la definición de viscosidad aparente dada por la ecuación (3) se expresa por:

$$\mu_a = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (5)$$

Si $n < 1$, un incremento del gradiente de velocidad provocará una disminución en la viscosidad del fluido, denominándose en estos casos fluidos pseudoplásticos.

Si $n > 1$, un incremento del gradiente de velocidad provocará un aumento en la viscosidad y estaremos en presencia de un fluidos dilatante.

Procedimiento experimental

Para el desarrollo de los experimentos se tomaron tres muestras de cal de diferentes orígenes:

O.G. 18 meses. Se trata de una cal en pasta producida por Oriol Garcia, S.L, de forma tradicional a partir del apagado en balsa de un CaO industrial procedente de la empresa Cales de Pacs S. A.. Ha envejecido a lo largo de 18 meses en bodega y en barril de plástico.

CC 12 meses. Pasta de cal producida industrialmente por la empresa Calcinor S.A., a partir del amasado con agua de una cal en polvo comercial posteriormente mantenida en bidón de plástico a lo largo de 12 meses. Según la futura nomenclatura recogida por el proyecto de norma europea [EN 459-1 2007], se trata de EN 459-1 CL 90-S PL

PACS 20 días. Pasta de cal preparada en el laboratorio a partir de cal cálcica apagada industrialmente CL 90-S, procedente de Cales de Pacs S. A. amasada con agua y envejecida 20 días.

Se ha determinado la distribución del tamaño de partículas, de las tres muestras de cal, a partir del análisis granulométrico mediante analizador por difracción láser LS 13 320 (Beckman Coulter), con redispersión previa de la muestra por ultrasonidos a lo largo de 10 minutos. Posteriormente se han caracterizado cristalográficamente mediante difracción de rayos X con un difractómetro Siemens D-500 con tubo de Cobre y se han sometido a análisis termogravimétricos realizados en una termobalanza TGA-SDTA 851e / SF / 1100 Mettler Toledo, con una velocidad de 10°C/min, en un ciclo de calentamiento de 30°C hasta 1100°C, en atmósfera inerte.

Finalmente se ha observado la forma de las partículas mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) de la marca Jeol JSM 6400.

La figura 1 ilustra la distribución granulométrica de las muestras y en la tabla 1 se recogen los principales indicadores estadísticos de las tres muestras comparadas.

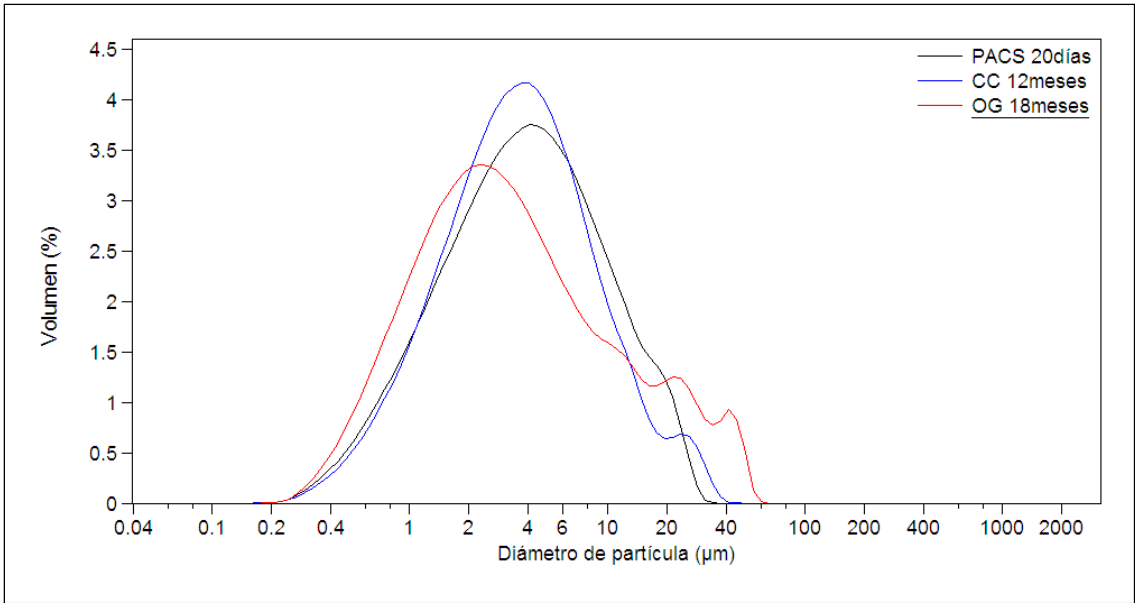
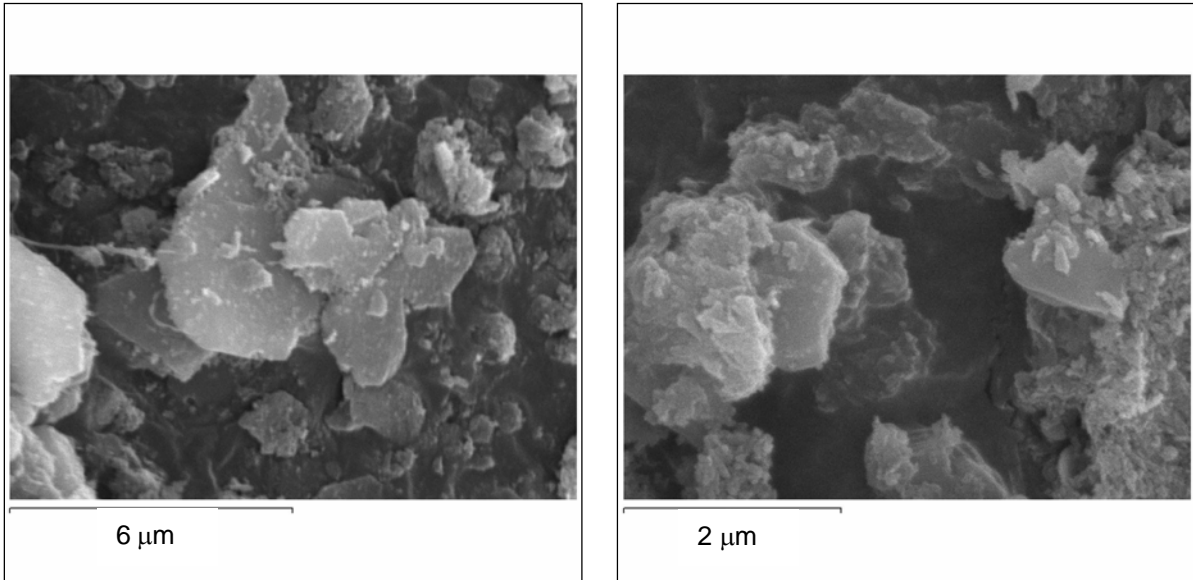


Figura 1. Análisis granulométrico correspondiente a las tres muestras analizadas.

	Media	Desv. Std.	c.v.	< 1 μm	< 10 μm	< 100 μm	< 10 %	< 25 %	< 50 %
O.G. 18 meses	6,978	9,683	139%	13,90%	80,20%	100%	0,83 μm	1,48 μm	3,03 μm
CC 12 meses	5,272	5,402	102%	8,77%	87,50%	100%	1,07 μm	1,91 μm	3,56 μm
PACS 20 días	5,57	5,202	93,40%	9,73%	84,10%	100%	1,01 μm	1,91 μm	3,82 μm

Tabla 1. Principales indicadores obtenidos en los análisis granulométricos, comparados entre las tres muestras de cal.

La interpretación del conjunto de resultados confirma la relación entre el envejecimiento de la cal en pasta y la reducción del tamaño de partícula. Este extremo se corrobora en la observación a microscopía electrónica Figura 2. La tendencia a la aglomeración, y la dificultad para la redispersión, parecen justificar la existencia de una cantidad significativa de falsas partículas de mayor tamaño.



PACS 20 días

O.G. 18 meses

Figura 2. Microfotografías de dos pastas de cal

Las fases cristalinas obtenida por DRX son únicamente Portlandita y Calcita (Figura 3). El análisis termogravimétrico TG no muestra pérdidas de peso significativas a las temperaturas de descarbonatación de la Calcita, sólo muestra pérdidas de agua de amasado y de constitución de la Portlandita (Figura 4). La presencia de la Calcita detectada en DRX se considera debida a una parcial carbonatación durante el proceso de manipulación de las muestras.

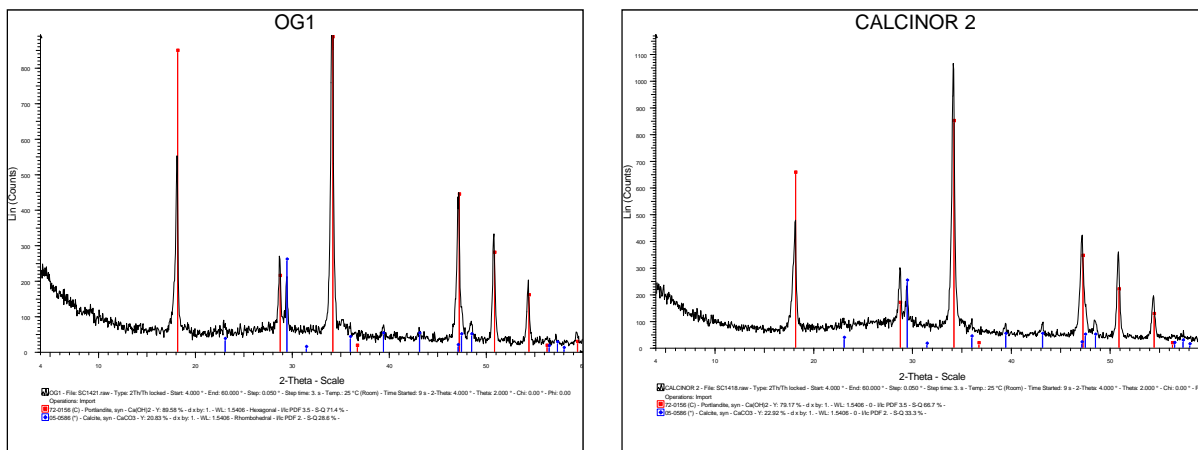


Figura 3. Difractograma correspondiente a O.G. 18 meses. Se identifican Portlandita i Calcita exclusivamente

Difractograma correspondiente a CC 12 meses. Se identifican Portlandita i Calcita exclusivamente.

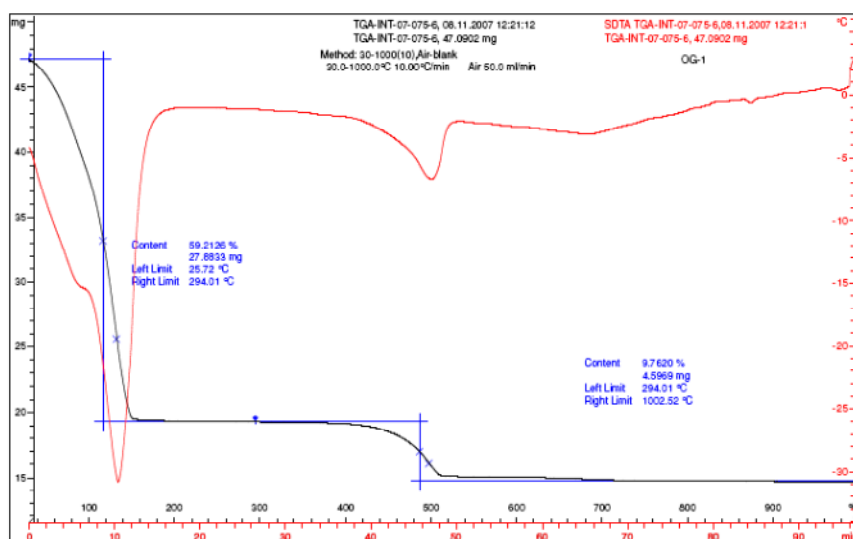


Figura 4. Curva termogravimétrica correspondiente a la muestra O.G. 18 meses.

- Técnicas reológicas de medición para la obtención de las curvas de flujo

Para el desarrollo de los experimentos se tomaron las tres muestras de pastas de cal, cada una de ellas con diferentes porcentajes de sólidos. Los experimentos reológicos fueron realizados en un viscosímetro rotacional Brookfield DV-II, el cual permite medir momentos con precisiones del 1% (Figura 5).



En el experimento se utilizó un cilindro de medición de 18,84 mm de diámetro y longitud equivalente de 74,9 mm. Para realizar las determinaciones se utilizó un recipiente estacionario de 120 mm de diámetro interno y profundidad de 200 mm. Cada muestra se prepara estacionando la muestra 24 horas y se decanta el agua superficial. La muestra se homogeneiza previamente mediante agitación mecánica durante varios minutos antes de utilizarse en el viscosímetro; según el funcionamiento del equipo se obtienen los diferentes valores del momento y velocidades de rotación (**N**). Posteriormente, se grafía el esfuerzo cortante (τ) vs tiempo (**t**) y se determinan los parámetros reológicos del gradiente de cizalla (γ) y del esfuerzo cortante, luego se ajusta la curva por regresión lineal en escala log-log y se determina el modelo que rige el comportamiento de la pasta (en el caso de las pastas de cal se ha considerado que corresponde a la ley de Potencia o Modelo de Ostwald de Waele).

Figura 5. Viscosímetro rotacional tipo Brookfield

Resultados experimentales

Para realizar la caracterización reológica de las diferentes muestras de pastas de cal utilizadas, se determinaron los valores de esfuerzo cortante (τ) y el número de revoluciones del cilindro rotor (**N**). A partir de estos valores y suponiendo que las pseudocurvas de flujo corresponden a un fluido del tipo Ostwald de Waele, se calculan los parámetros reológicos: índice de consistencia (**K**) y índice de flujo (**n**).

En la Figura 6 se muestran los valores de τ vs **t** para la muestra de pasta de cal CC envejecida 12 meses con un 51,12% y 48,78% de sólidos de Ca(OH)_2 y diferentes velocidades de rotación del cilindro **N**. Cuando la velocidad de rotación es alta y el tanto por ciento de sólido es elevado las medidas son erróneas hasta que se estabilizan.

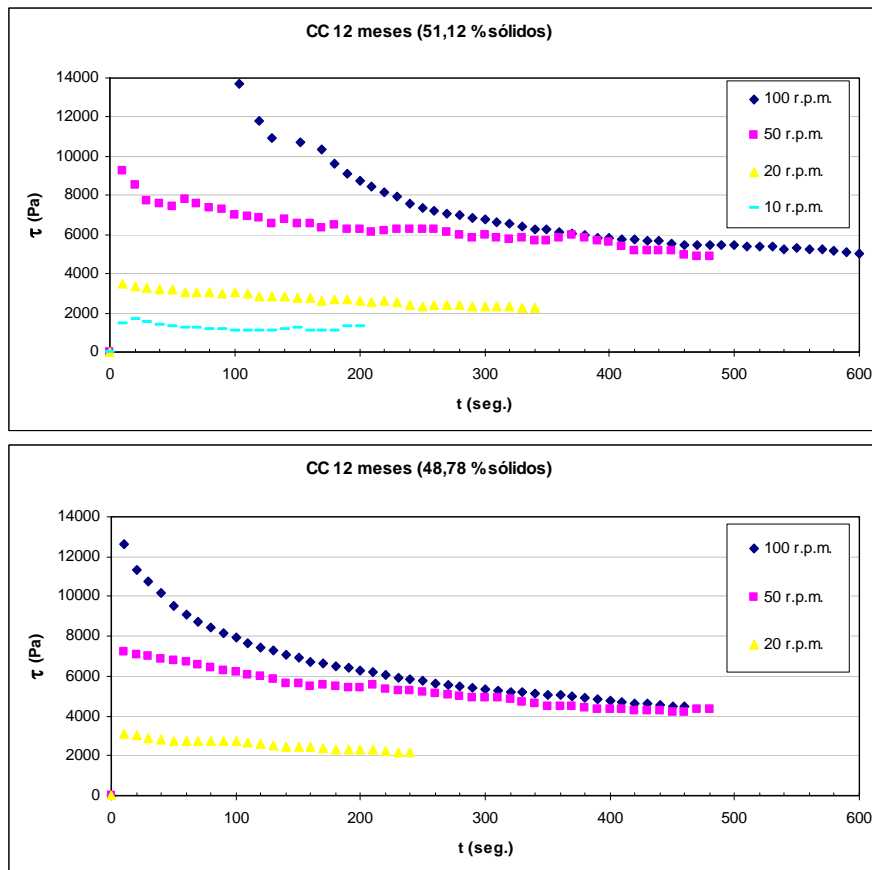


Figura 6. Evolución temporal del esfuerzo de cizalla para distintas velocidades de rotación del cilindro y para 51,12% de sólido y para 48,78% de sólido

En la Figura 7 se muestra la evolución temporal del porcentaje máximo de momento o par de cilindro para la pasta de cal CC de 12 meses con diferentes porcentajes de sólido para velocidad de rotación de 100 r.p.m..

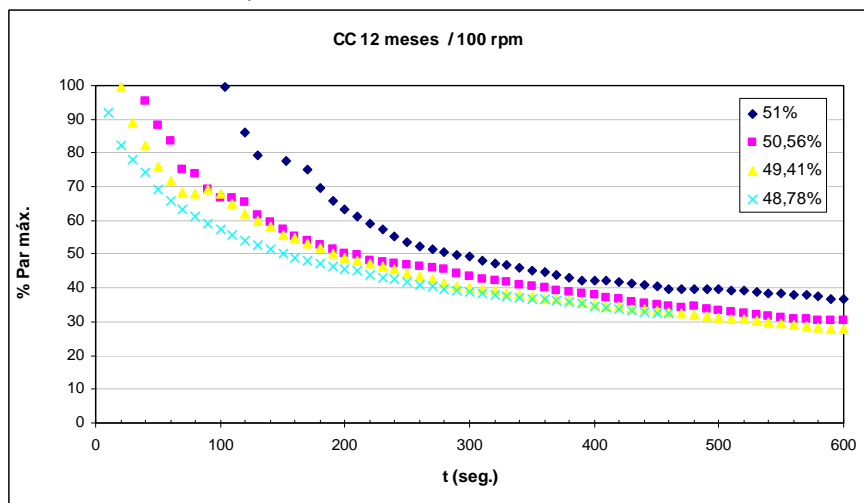


Figura 7. Evolución temporal del porcentaje de par máximo para diferentes porcentaje de sólidos.

La Figura 8 muestra el comportamiento del flujo para la muestra CC de 12 meses al comienzo ($t = 150$ s) de la evolución temporal. Como se puede observar, el índice de consistencia K disminuye a medida que aumentamos la concentración de sólido. El índice de flujo n , aumenta con la concentración de sólido.

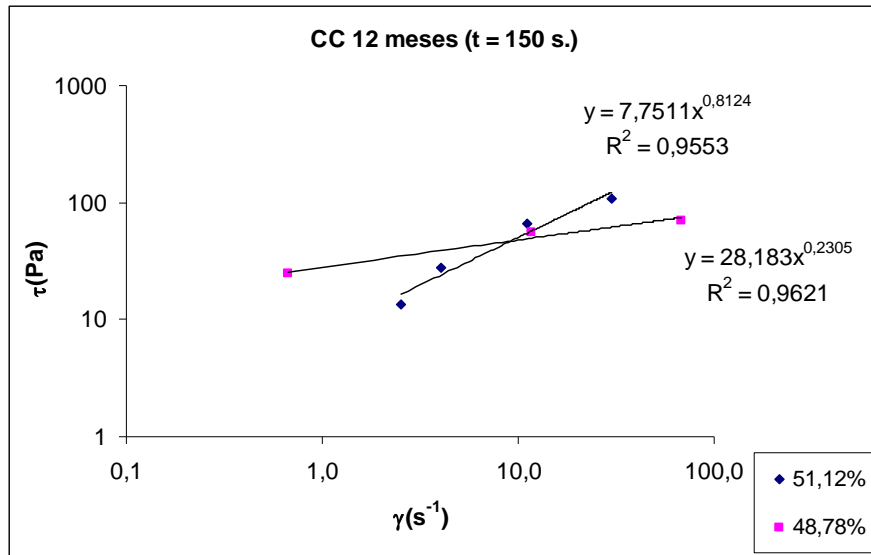
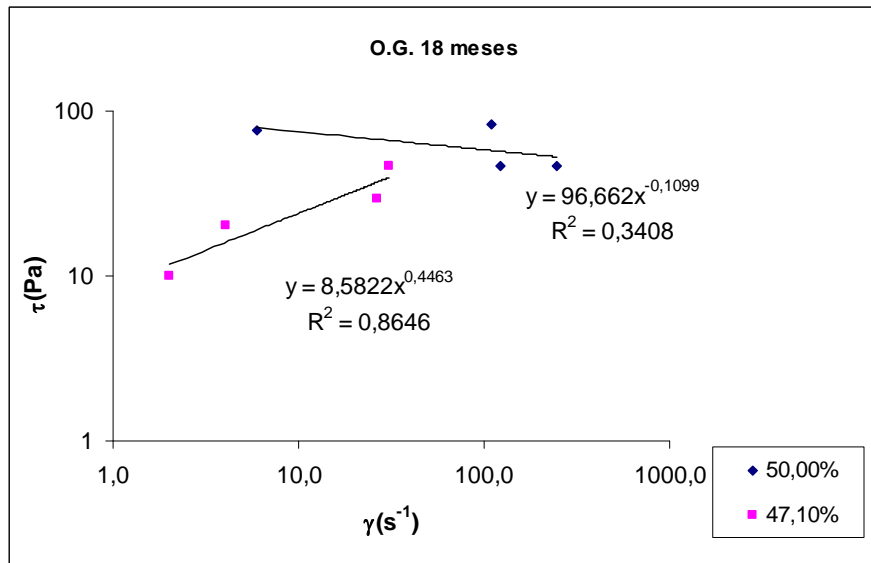


Figura 8. Esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad al comienzo de la evolución temporal.

La Figura 9 muestra el comportamiento de las tres pastas de cal al final de su evolución temporal para diferentes concentraciones de sólido. La pasta de cal OG de 18 meses y 50% de concentración de sólido muestra un comportamiento anómalo que no se ajusta a una ley potencial, esto es debido a la agregación de partículas y la resistencia al movimiento debido a su heterogeneidad.



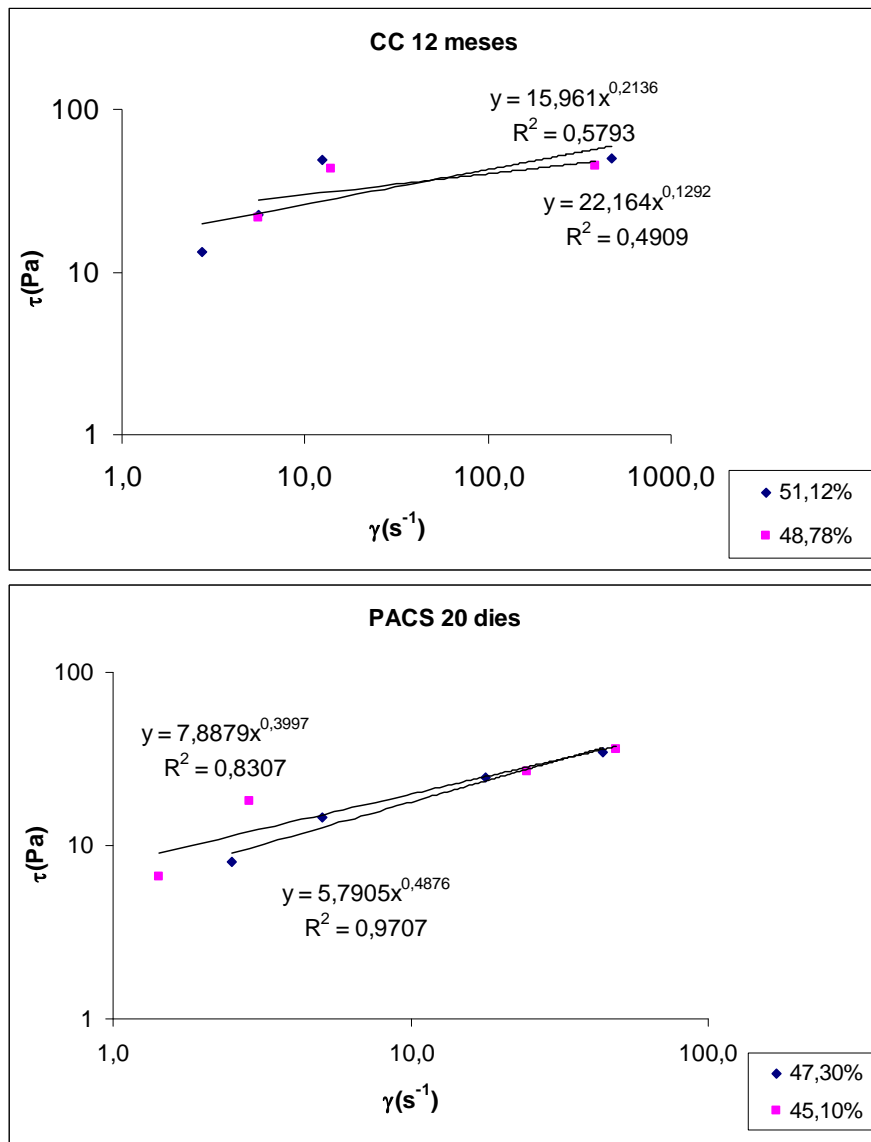


Figura 9. Esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad para las tres pastas analizadas de diferente antigüedad.

En la Figura 10 se comparan las tres pastas de diferente antigüedad al comienzo del experimento, una vez transcurridos los primeros 150 segundos, para dar tiempo a eliminar la transitoriedad. En este caso el índice de comportamiento del flujo, n , aumenta con la antigüedad de las pastas.

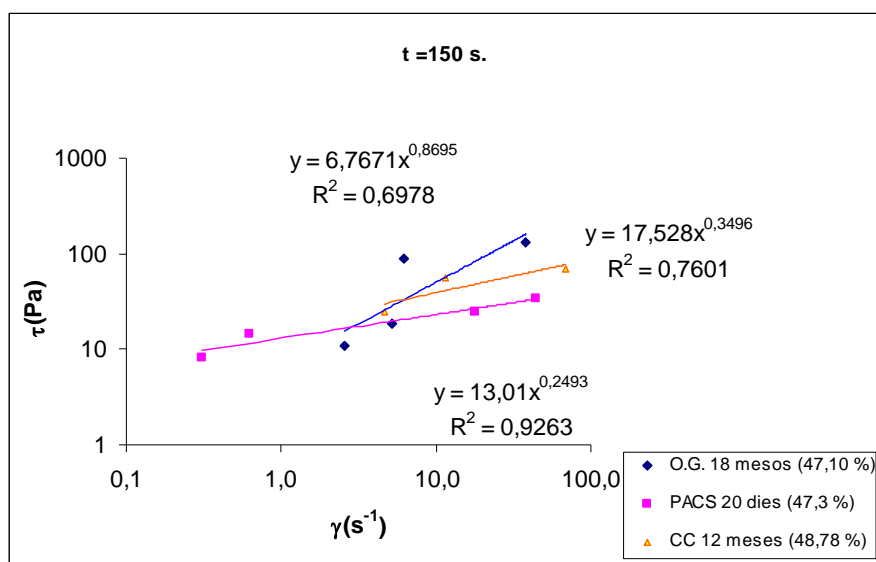


Figura 10. Comparativa de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad para las tres pastas en el comienzo y al final de la evolución temporal

Las pastas estudiadas son fluidos no newtonianos altamente pseudoplásticos que se han ajustado convenientemente al modelo Ostwald de Waele. De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que estas pastas son fluidos altamente viscosos con un índice de flujo que varía de 0,87 a 0,25, y con índices de consistencia que varían entre 6.77 y 17.6 para las distintas antigüedades.

El índice de consistencia aumenta con el incremento del contenido de humedad. La influencia de estas variables debe ser estudiada con más detenimiento en un mayor número de muestras, con vistas a poder determinar su efecto específico sobre las propiedades reológicas.

Conclusiones

Estos resultados son preliminares y muestran que las herramientas de análisis son válidas y permiten discriminar científicamente las tradicionales apreciaciones organolépticas realizadas por los operarios que trabajan en el ámbito de la cal en la construcción.

Los resultados obtenidos mediante estas herramientas podrán ser comparados con otras técnicas más simples (escurrimiento, cono de Mars, mesa de sacudidas, etc.) buscando las mejores correlaciones entre distintas técnicas, para finalmente pautar sistemas y metodologías fácilmente implementables.

Del análisis de los resultados obtenidos se llega a las siguientes conclusiones:

1. Las pastas de cal son materiales altamente viscosos que se han ajustado convenientemente al modelo reológico de Ostwald de Waele.
2. Las pastas de cemento son productos altamente pseudoplásticos con índices de flujo comprendidos entre 0,87 y 0,25.
3. El índice de consistencia aumenta con el incremento de la humedad, mientras que el índice de flujo aumenta con la antigüedad.
4. Se ha comprobado que el tamaño de grano es inferior en las pastas más antiguas, tal como era de esperar.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Químicas de la Universidad de Barcelona. por la utilización del viscosímetro Brookfield.

Agradecemos a Cales de Pacs S.A. y a Oriol García por todas las facilidades prestadas para este y otros estudios referentes a la cal.

Este estudio ha sido financiado por MEC (Spain), por los proyectos FIS2005-06912-C02-01 y FIS2006-11452-C03-02.

Bibliografía

Alberti L. B. (1966) De re aedificatoria, siglo XV.

Atzeni C., A. Farsi, D. Floris, P. Meloni (2004)- Effect of Aging on Rheological Properties of Lime Putty. J. Am. Ceram. Soc., **87** [9] 1764-1766

EN 459-1 2007 Building lime.

Plinio Secondo G.. (1988) Naturalis Historia, libro quinto, 709-711, G. Einaudi, Torino

Rattazzi A.. (2007) Conosci il Grassello di Calce?. Edicom Edizioni

Rodríguez-Navarro C., Eric Hansen y William S. Ginell (1998) "Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Aging of Lime Putty" J. Am. Ceram. Soc. 81 [11];

Anexo 3. Poster “Características reológicas de pastas de cal”

Presentado: En el libro de ponencias se publicó un texto resumen del tema.

Presentado: X Congreso Nacional de Materiales; San Sebastián; junio 2008.

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE PASTAS DE CAL

J.R. Rosell¹, I. Rodríguez¹, S. Chinchón², L. Haurie¹, A. Navarro¹

1 Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. UPC. Avda. Gregorio Marañón, 44-50. 08028 Barcelona
2 Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Alicante. Campus de Sant Vicente de Raspeig.
03080 Alicante

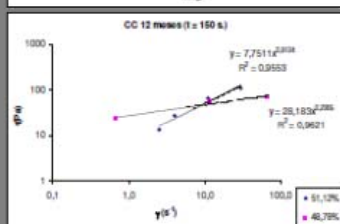
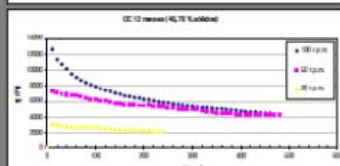
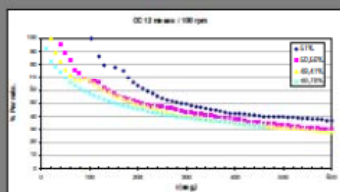
rosell@ma.upc.edu

¿Cal en pasta o pasta de cal hidratada?

La cal como conglomerante ha pasado de ser el material universal de la construcción a un uso limitado en obras de restauración. Los escasos operarios que provienen de aguas de artesanos hoy siguen trabajando con este material y loan sus virtudes, en particular la trabajabilidad en su colocación. Aparece una "nueva" discusión. La cal a utilizar debe ser en pasta apagada en balsa, como manda la tradición, o puede ser en polvo y posteriormente pastada con agua.

Este trabajo presenta las características reológicas de pastas de cal, especificando la influencia de su origen en la obtención de valores de trabajabilidad. El estudio se realiza sobre pastas de cal hidratada de diferentes edades de maduración y sobre pastas procedentes de cal en polvo, hidratadas posteriormente.

Se presentan los resultados obtenidos tanto a nivel de tamaño de grano (granulometría láser), estructura cristalina (difracción de rayos X y microscopía electrónica), así como su trabajabilidad (viscosidad plástica, límite de escurrimiento) dependiendo de la cantidad de agua añadida y de la retención de ésta por cada pasta.



Estacionamiento de la muestra 24 horas y decantación agua superficial

Homogeneización previa mediante agitación mecánica durante varios minutos

Medición con viscosímetro para $\sigma = \sigma_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$ (r.p.m.)
estrujeo cortante, tiempo t (s)

Incremento de agua

Se grafica esfuerzo cortante (τ) vs tiempo (t)

$$\tau = \text{Par medido} / Q \cdot \eta$$

Se determinan los parámetros reológicos del gradiente de velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) y del esfuerzo cortante (τ), para (t) tipo o hasta estabilización

$$\tau = 4 \times 10^3 (d \log \dot{\gamma} / d \log \text{Par})$$

Se ajusta la curva por regresión lineal en escala log-log para el modelo que rige el comportamiento de la pasta (en el caso de las pastas de cal se ha considerado que corresponde a la ley de Potencia o Modelo de Ostwald de Waele).

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

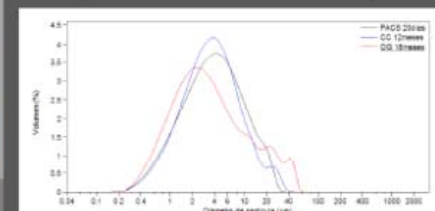
K = índice de consistencia;

n = índice de flujo

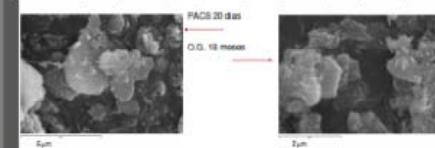


MATERIALES

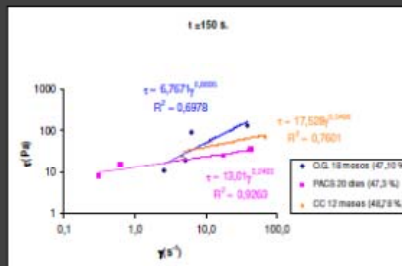
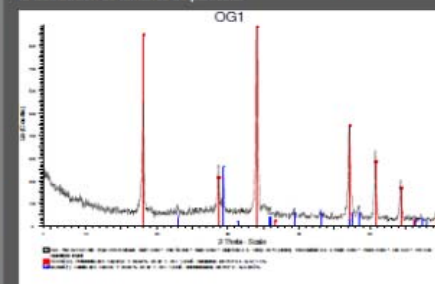
O.G. 18 meses	Cal en pasta producida por Oriol Garcia, S.L. de forma tradicional a partir del apagado en balsa de un CaO industrial procedente de la empresa Calas de Pacs S.A. Ha envejecido a lo largo de 18 meses en bodega y en barril de plástico.	Cal en pasta (graseado)
OC 12 meses	Pasta de cal producida industrialmente por la empresa Calcinor S.A., a partir del amasado con agua de una cal en polvo comercial posteriormente mantenida en bidón de plástico a lo largo de 12 meses. Según la futura nomenclatura recogida por el proyecto de norma europea [EN 459-1 2007], se trata de EN 459-1 CL 90-S PL.	Pasta de cal
PACS 20 días	Pasta de cal preparada en el laboratorio a partir de cal cálcica apagada industrialmente CL 90-S, procedente de Calas de Pacs S. A. amasada con agua y envejecida 20 días.	Pasta de cal



	Medio	100 µm	200 µm	400 µm	600 µm	800 µm	1000 µm	1250 µm	1500 µm	2000 µm	2500 µm	3000 µm
O.G. 18 meses	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
OC 12 meses	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PACS 20 días	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03



La composición de la pasta resultante es en todos los casos la misma: Ca(OH)₂ como fase mayoritaria y CaCO₃ como componente minoritario. Se observan diferencias en la distribución de tamaños de partícula.



Conclusiones:

Estos resultados son preliminares y muestran que las herramientas de análisis son válidas y permiten discriminar científicamente las tradicionales apreciaciones organolépticas realizadas por los operarios que trabajan en el ámbito de la cal en la construcción.

Los resultados obtenidos mediante estas herramientas podrán ser comparados con otras técnicas más simples (escurrimiento, cono de Marsh, mesa de sacudidas, etc.) buscando las mejores correlaciones entre distintas técnicas, para finalmente pautar sistemas y metodologías fácilmente implementables.

Del análisis de los resultados obtenidos se llega a las siguientes conclusiones preliminares:

1. Las pastas de cal son materiales altamente viscosos que se han ajustado convenientemente al modelo reológico de Ostwald de Waele.
2. Las pastas de cal son productos altamente pseudoplásticos con índices de flujo comprendidos entre 0,87 y 0,25 (para el caso estudiado).
3. El índice de consistencia aumenta con el incremento de la humedad, mientras que el índice de flujo aumenta con la antigüedad.
4. Se ha comprobado que el tamaño de grano es inferior en las pastas más antiguas, tal como era de esperar.

Bibliografía

- [1] Rosell, J.R. (2007) Construcción de Cal. Edición Espasa.
- [2] Pérez Sánchez, G. (1988) Naturaleza Histórica, 400 años, 703-711, G. Sureda, Tarragona.
- [3] Albert, L.B. (1964) On the constitution, 400 años, 703-711, G. Sureda, Tarragona.
- [4] Rodríguez, N. (2007) Construcción de Cal. Edición Espasa.
- [5] Albert, L.B. (1964) On the constitution, 400 años, 703-711, G. Sureda, Tarragona.



Anexo 4. ¿Existen diferencias en las cales apagadas por distintos métodos tradicionales?: la experiencia de Zone (BS)

Publicado: ARKOS SCIENZA E RESTAURO; ISSN 1974-7950; núm. 22; mar. 2010.

Presentado: Convenio Calce 2009; Foro Italiano Calce; Génova (Italia); dic. 2009.

EXISTEN DIFERENCIAS EN LAS CALES APAGADAS POR DISTINTOS MÉTODOS TRADICIONALES?: LA EXPERIENCIA DE ZONE (BS)

J. R. Rosell¹, L. Haurie¹, M. Bosh¹, A. Rattazzi², I. R. Cantalapiedra¹

¹Escola Politècnica Superior d'Edificació, Universitat Politècnica de Catalunya

²Forum Italiano Calce - La Banca della Calce, Bologna

1. INTRODUCCIÓN

El día 31 de julio de 2009 se realizó, en Zone (Italia), una jornada organizada por el Forum Italiano Calce, a la que fuimos invitados un equipo de profesores de la Universitat Politècnica de Catalunya, con el objetivo de conocer diferentes sistemas tradicionales de apagado de la cal, obtener datos respecto a los distintos comportamientos térmicos y, finalmente, tratar de identificar diferencias mesurables entre las cales apagadas con los diversos sistemas.

La población de Zone se encuentra en plena *Via Valeriana*, la vía romana que unía la ciudad de Brescia con la *Val Camonica*, un valle de origen glaciario, caracterizado por las grandes extensiones de piedra calcárea sedimentaria. Esta circunstancia geológica ya propició en su momento el desarrollo de las actividades extractivas y de calcinación de la abundante piedra caliza, una tradición que ha persistido hasta la actualidad gracias a los trabajos de recuperación de las técnicas de construcción tradicionales y en concreto de las que están relacionadas con la cal de los propios habitantes del valle.

Aprovechando la circunstancia de que por primera vez se encendía un antiguo horno de cal (restaurado por los hermanos Cagni Muri en el año 1997), el Forum Italiano Calce organizó un taller en el que se mostraban distintas maneras de proceder al apagado de la cal una vez ésta era extraída del horno: el sistema por aspersión en balsa de madera o ordinario; el sistema "Grande aqua" y, finalmente, el sistema por inmersión breve.

El método de apagado por aspersión (Z2) consistió en extender terrones de cal en una balsa de madera de unos 3 x 6 m y 0,4 m de altura, desechando las piedras aparentemente mal cocidas y las impurezas. A continuación se regó abundantemente la cal, se desmenuzaron los fragmentos más grandes con la ayuda de palas de madera para facilitar la mezcla y la disgregación de los terrones, produciéndose así el proceso de apagado. La pasta de cal obtenida se clasificó por tamaños de partícula a partir: del tamizado en continuo, lo que permitió eliminar los "grappiers" y las impurezas; y, posteriormente por decantación, en dos etapas previas al almacenado.

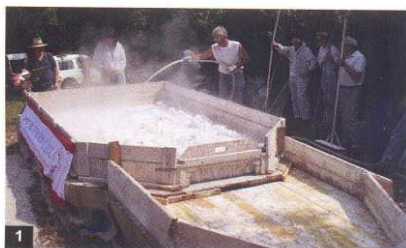


Figura 1
Apagado por aspersión en balsa de madera.



Figura 2
Etapa de decantación de la lechada de cal.

El segundo sistema utilizado, llamado "Grande aqua" (Z3) consistió en realizar un pequeño pozo en el suelo de dimensiones aproximadas 1,2 x 0,6 m y 1 m de profundidad que se llenó, hasta la mitad, con las piedras calcinadas procedentes del horno de cal. Se vertió en el pozo una cantidad aproximada de 200 litros y se esperó a

que la cal empezase a bullir. Pasados unos minutos se vertieron otros 400 litros (la capacidad de dos bidones) y se removió la pasta de cal. En algunas experiencias previas realizadas con este sistema, la exotermia del proceso ha provocado una explosión de cierta virulencia.



Figuras 3 y 4
Proceso de apagado "Grande aqua".

Finalmente, el tercer sistema estudiado durante la jornada fue el denominado "por inmersión breve" (Z4), consistente en llenar un cesto de mimbre para unos 15/20 litros hasta un cuarto de su capacidad, e introducirlo en un pozo de agua hasta su completa

inmersión. Se retiró casi inmediatamente el cesto y se dejó a la intemperie mientras la cal se hidrataba, aumentando de volumen y temperatura durante un proceso que puede llegar a durar varias horas.



Figuras 5 y 6

Proceso de apagado por inmersión breve.

2. MATERIALES Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS

De la cal obtenida en el horno tradicional de Zone se tomaron diversas muestras: unos fragmentos de piedra calcinada recién salida del horno (Z1); una muestra (Z2) de la cal apagada con el sistema por aspersión, tomada después del segundo tamiz; una muestra de cal (Z3) obtenida por el sistema "Grande aqua"; y una

muestra de cal (Z4) procedente del sistema de apagado por inmersión.

La muestra de cal Z1 (piedra calcinada) se ha sometido a diversos procesos de apagado en laboratorio a partir de distintas proporciones agua/cal. La siguiente tabla muestra la nomenclatura de las

Tabla 1. Identificación de las muestras

Muestra	Proceso de apagado	Tipo de cal
Z2	Por aspersión	Cal en pasta
Z3	"Grande aqua"	Cal en pasta
Z3	Immersion breve	Cal en polvo
Z1 1:2	Lab, Relación: 2:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:3	Lab, Relación: 3:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:4	Lab, Relación: 4:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta
Z1 1:5	Lab, Relación: 5:1 (Agua:cal viva)	Cal en pasta

distintas muestras:

Para el registro de temperaturas de los trabajos realizados in situ y en laboratorio se utilizó:

- Un equipo de termovisión InfraCAM SD de FLIR Systems,

que permite medir la radiación infrarroja producida por un elemento. El receptor de infrarojos ha sido ajustado para una emisividad de 0,9. El rango de temperaturas del sensor de la cámara es $-15^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$.

SOMMARIO

Nel giugno 2009, a Zone (BS), è stato condotto lo spegnimento di una calce cotta in una fornace tradizionale degli inizi del '900, nell'ambito di un corso organizzato dal Forum Italiano Calce.

La calce è stata spenta con diversi metodi: aspersione, immersione e grande acqua.

Durante lo spegnimento, sono state condotte misure di temperatura tramite termometri e termocamera.

I campioni di calce spenta sono stati caratterizzati attraverso molteplici tecniche di laboratorio: diffrazione di raggi X (XRD), fluorescenza di raggi X (XRF), termogravimetria, superficie specifica (BET), granulometria laser, microscopia elettronica a scansione (SEM).

Contemporaneamente, in laboratorio, la calce viva prodotta a Zone è stata spenta utilizzando diversi quantitativi di acqua, in modo da simulare i distinti sistemi di spegnimento tradizionali e studiare gli effetti della temperatura a cui avviene il processo sulla qualità della calce spenta ottenuta.

Il confronto tra i dati, permette di evidenziare che i diversi metodi di spegnimento determinano differenze importanti sulla calce spenta, riferibili soprattutto alla dimensione e alla distribuzione granulometrica dei cristalli.

SUMMARY

In June 2009, an experiment was conducted in Zone (Brescia), consisting of the slaking of lime fired in a traditional early twentieth century kiln, as part of a course organised by the Italian Lime Forum.

The lime was slaked using different methods: aspersion, immersion and excess water.

During the slaking process, temperature measurements were carried out using thermometers and heat cameras.

The samples of slaked lime were characterised using a range of laboratory techniques: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), thermogravimetry, specific surface (BET), laser granulometry, scanning electron microscope (SEM). At the same time, in a laboratory environment, the quicklime produced in Zone was slaked using different amounts of water, so as to simulate the different traditional slaking systems and to study the effects of the temperature at which the process is carried out on the quality of the lime paste obtained.

The comparison of the two sets of data shows that the different slaking methods result in important differences in the lime paste obtained, especially in terms of the size and granulometric distribution of the crystals.

- Un equipo de lectores de temperatura mediante termopares tipo K con almacenamiento de datos.

Para caracterizar las muestras de cal se utilizaron las siguientes técnicas:

- Fluorescencia de rayos X (FRX) utilizada para determinar la composición química de la muestra Z. El equipo usado es un espectrofotómetro secuencial Philips PW2400.
- Difracción de rayos X (DRX). Los espectros de las muestras Z2, Z3 y Z4 se obtuvieron mediante radiación con Cu Ka 1 con un difractómetro Panalytical alfa powder. Las muestras de cal fueron secadas en atmósfera de nitrógeno para prevenir la carbonatación.
- La distribución del tamaño de partículas se ha determinado con un equipo Beckman Coulter LS 13 320. El disolvente utilizado es agua y se utilizaron ultrasonidos para homogeneizar la muestra y deshacer las agregaciones.
- La superficie específica ha sido medida con el método BET con un equipo Micromeritics Tristar 3000.
- Para el análisis termogravimétrico (TGA) y el análisis termodiferencial (DTA) se ha utilizado una termobalanza Mettler Toledo TGA-

SDTA 851e/SF/1100, en aire, con una rampa de incremento de temperatura de 20 °C/min para un rango de 25 a 1000°C.

- La morfología superficial de las muestras ha sido observada mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) Hitachi H-4100FE.
- La viscosidad de las muestras de pasta de cal Z2 y Z3 se ha obtenido con un viscosímetro rotacional Thermo Haake Viscotester 7L Plus.

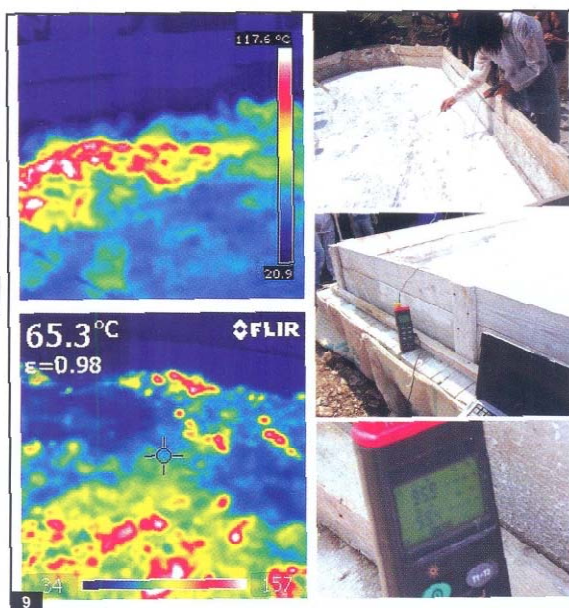
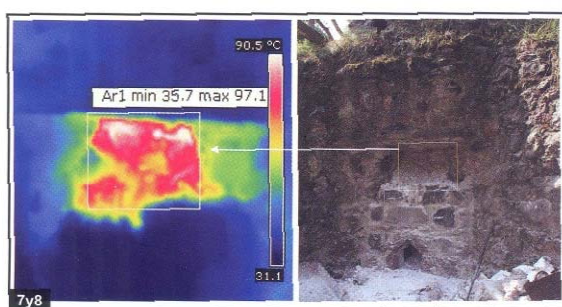
Las muestras se han dispersado en agua hasta un 30 % de contenido sólido. La lechada resultante ha sido homogeneizada durante 2 minutos y analizada usando los vástagos L3 y L4.

Durante 4 minutos se somete la muestra a una rotación de 10 r.p.m. y se toman datos de tiempo (s), par(Pa) y viscosidad (Pa.s). El valor de la viscosidad se determina a partir del promedio de los últimos 20 seg.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Temperaturas registradas *in situ* y en laboratorio.

Se realizaron lecturas de temperaturas en el momento de la descarga del horno. A pesar de que el horno llevaba una semana apagado las temperaturas de la cal viva aún se conservaban cercanas a los 90°C (figuras 7 y 8).



Figuras 7 y 8

Termografía correspondiente a la zona de descarga del horno.

Figura 9

Diversas termografías tomadas durante el apagado de la cal por aspersión y toma de temperaturas con termopares correspondiente al mismo proceso.

Como se puede observar en las imágenes (Figura 9), el proceso de apagado por aspersión comporta una heterogeneidad en cuanto a las temperaturas registradas, relacionadas con la cantidad de agua. En aquellas zonas en las que la cal está completamente ane-

gada, el calor se disipa rápidamente por lo que las temperaturas registradas son más bajas, mientras que en aquellas zonas no anegadas, las temperaturas son superiores, alcanzando en algunos puntos los 100°C o más.

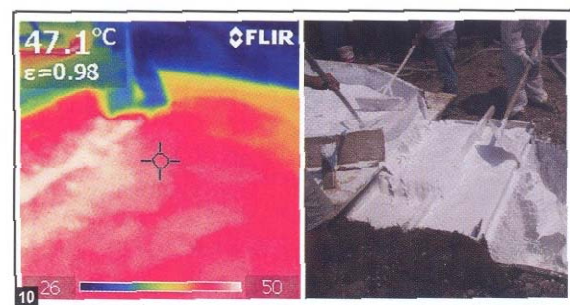


Figura 10

Termografía tomada durante el proceso de decantación de la lechada de cal, previa al tamizado.

En cambio, durante el proceso de decantación y antes del tamizado de la lechada de cal, las lecturas con la cámara termográfica



muestran unas temperaturas muy homogéneas y que oscilan entre los 40/50 °C (figuras 10 y 11).

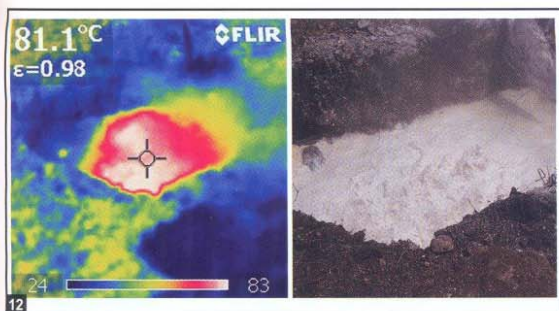
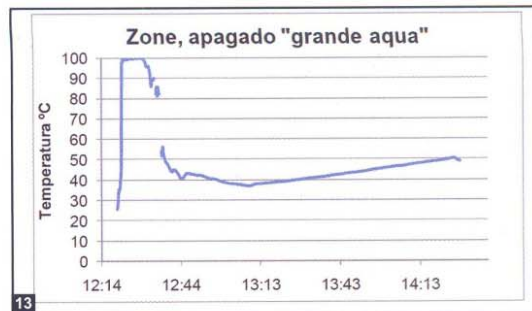


Figura 12

Termografía tomada durante el proceso de apagado con el sistema "grande agua".

En cuanto al sistema de apagado "grande agua", en el que la cal se encuentra completamente anegada, la temperatura no supera los 100°C. También se ha observado que, durante los primeros minutos del proceso, la temperatura baja de manera continuada a



13

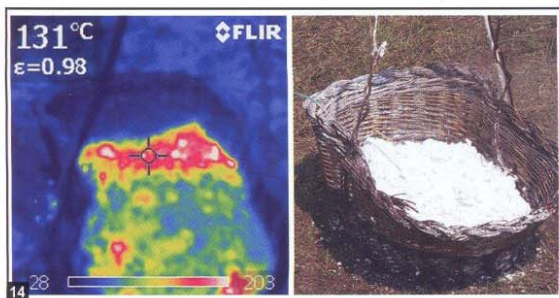


Figura 14

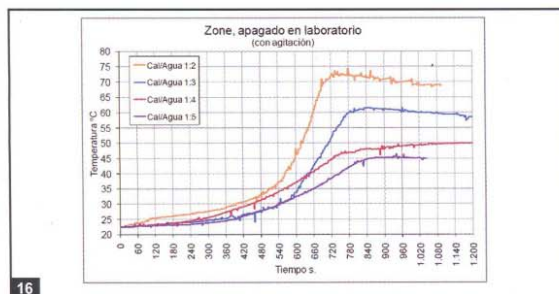
Termografía tomada durante el proceso de apagado con el sistema "grande agua".

A partir del sistema de apagado por inmersión breve se consigue generar cal en polvo. La escasez de agua utilizada en este proceso explica las altas temperaturas que se generan en el interior de



15

medida que la pasta de cal se remueve, pero al cabo de una hora se ha podido comprobar que la temperatura vuelve a subir aproximadamente unos 10 °C (de 40°C a 50°C) (figuras 12 y 13).



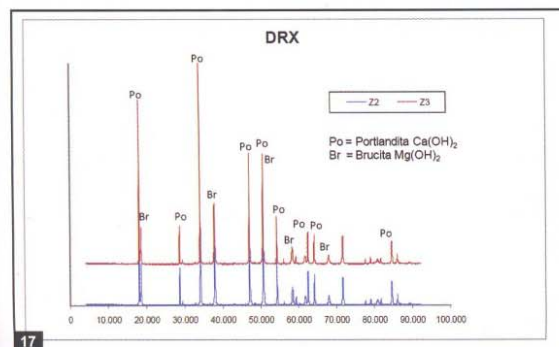
16

la masa (hasta 350°C) y que se mantienen por encima de los 100°C a lo largo de las 3,5 horas siguientes desde el inicio del proceso (figuras 14 y 15).

En los procesos de apagado realizados en laboratorio a partir de las muestras Z1, la temperatura máxima alcanzada disminuye con el aumento del agua añadida, pero en ningún caso se superan los 75 °C para las distintas relaciones cal/agua estudiadas (figura 16).

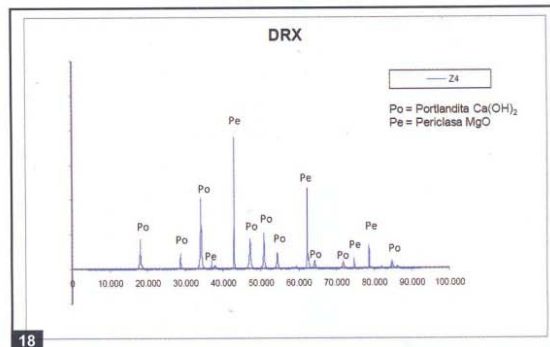
3.2 Caracterización de las cales.

El análisis por FRX de la muestra Z1, obtenida por calcinación de roca dolomítica en horno tradicional, revela la presencia mayoritaria de calcio y magnesio. La composición expresada en forma de porcentajes de óxidos es de 57 % de CaO y de 38 % de MgO.



17

Los espectros de DRX de las muestras apagadas in situ se presentan en las figuras 17 y 18. En todos los casos la fase cristalina principal se corresponde con el hidróxido de calcio (portlandita). Asimismo, en los espectros de las muestras Z2 y Z3 también apa-

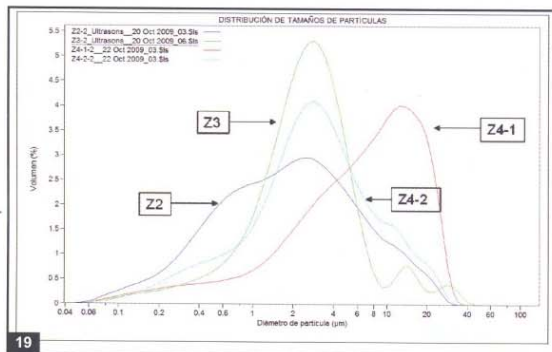


18

recen los característicos picos de hidróxido de magnesio (brucita), mientras que para la Z4 se distinguen los óxidos de magnesio originales (periclase) y no se detectan hidróxidos de magnesio. Este hecho puede explicarse en relación con la diferente cinética

de hidratación del CaO y del MgO. La hidratación de la cal viva para formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es más rápida que la hidratación de la “periclasa” como ocurre a través de un mecanismo que implica cuatro fases [Yukitaka Kato y otros. Applied Thermal Engineering, 16, (11), 853-862, 1996]. Si se produce una falta de agua durante el apagado, como sucede en el caso del proceso por inmersión breve (Z4), el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se puede formar antes que el $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Por otro lado, la hidratación suave de la periclasa puede explicar el incremento diferido de temperatura representado en la figura 13 de la muestra Z3, obtenida mediante el proceso de apagado “grande agua”. En este caso, la adición súbita de gran cantidad de agua y la ausencia de agitación puede provocar que las partículas de CaO, más reactivas, se hidraten antes y, en consecuencia, los núcleos de MgO lo hagan de forma diferida y de manera menos exotérmica.

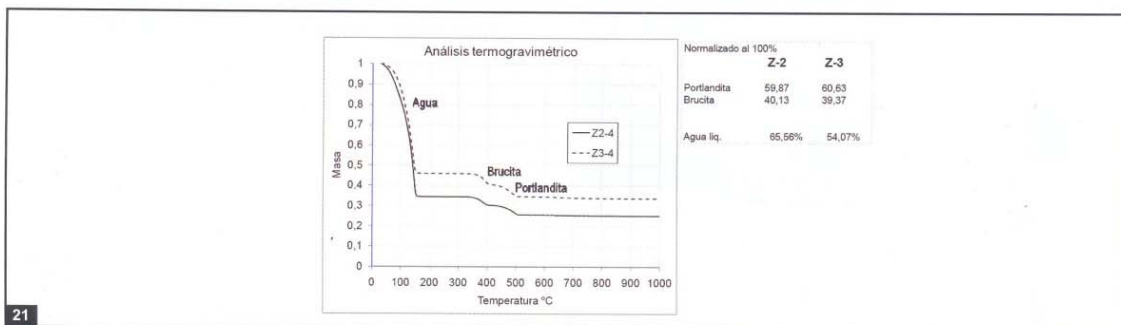


	< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 95 %
Z-2	0,36	0,76	1,91	4,39	13,89
Z-3	0,77	1,52	2,57	4,07	12,99
Z-4.1	1,16	3,16	7,30	13,53	23,04
Z-4.2	0,57	1,47	2,87	5,47	15,44

(> 80 μm) (< 80 μm) μm

La figura 19 ilustra la distribución volumétrica del tamaño de partículas para las muestras Z2 y Z3 y para las dos fracciones de tamizado secas de las muestras Z4: Z4.1 (> 80 μm) y Z4.2 (< 80 μm). Como puede observarse en la figura 20 el proceso de apagado por inmersión breve permite mayores tamaños de partícula, mientras que el sistema de apagado por aspersión, con gran-

des aportaciones de agua, agitación y decantación, proporciona valores de tamaño de partícula inferiores. Aunque se han podido observar partículas pequeñas en todas las muestras, la amplia distribución del tamaño de partículas, con colas de distribución superiores a 40 μm, probablemente indica la existencia de aglomerados.



La “descomposición térmica” del hidróxido de magnesio y del hidróxido de calcio se ha producido alrededor de los 340°C y 450°C respectivamente. Este hecho puede observarse en el análisis termogravimétrico de las muestras Z2 y Z3 ya que se distinguen en la figura 21 ambos escalones. Asimismo se pudo evaluar el agua contenida en la pasta de cal.

La cuantificación de los porcentajes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y agua de cada muestra presenta mayor cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y agua en la muestra Z2. Este hecho bien podría relacionarse con una intercalación mayor de agua en la estructura del hidróxido

cuando el apagado se produce bajo condiciones menos agresivas. Siguiendo esta tendencia, los registros de viscosidad que se muestran en la figura 22, revelan que, pasados los tres meses de edad, la muestra Z2 tenía una viscosidad significativamente superior a la de la muestra Z3, comparable con las de otras calces más antiguas. Las diferencias en las características morfológicas obtenidas de las muestras observadas con SEM (figura 23), con formas de partícula más geométricas y definidas para la muestra Z2, reafirman los resultados de viscosidades y de presencia de agua obtenida con el TGA.

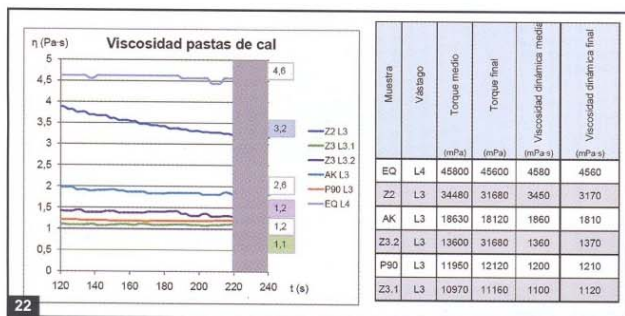


Figura 22

Resultados de las medidas de viscosidad. La muestra EQ corresponde a una cal caliza en pasta de 25 años de envejecimiento, la muestra AK corresponde a una cal caliza en pasta de 3 años de envejecimiento y la muestra P90 corresponde a una cal en polvo CL90.

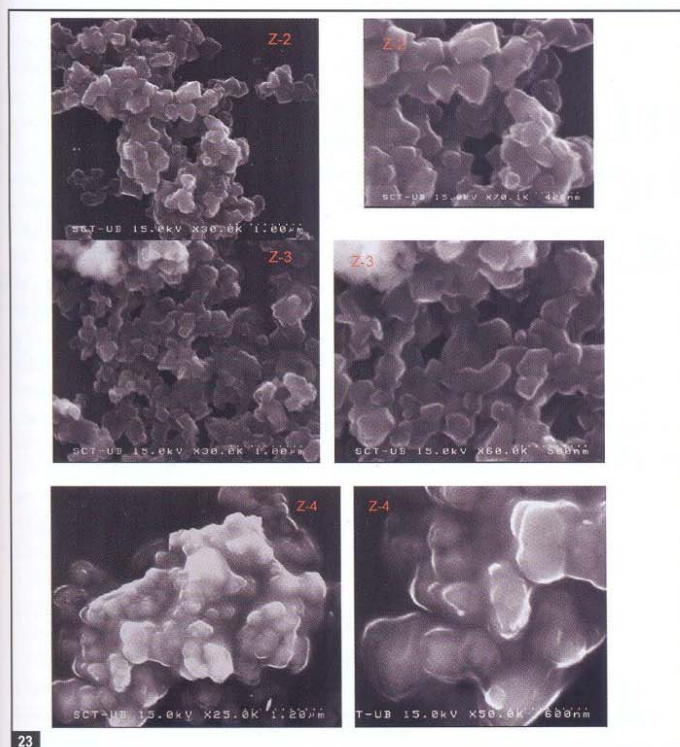


Figura 23

Imágenes obtenidas por SEM de las tres muestras.

4. CONCLUSIONES

Los tres productos de cal hidratada estudiados, producidos a partir de una misma cal viva en terrones, y apagada de diferentes maneras, han mostrado algunas diferencias significativas:

- De composición.

El apagado por inmersión breve no ha producido la hidratación de la periclase por falta de agua inicial. La elevada temperatura generada por la hidratación del CaO evapora el agua.

No hay diferencias de composición entre los productos obtenidos por los otros sistemas de apagado (Ca(OH)_2 y Mg(OH)_2)

- De tamaño de partícula.

El sistema de apagado en balsa produce cales más finas, de menores tamaños de partícula.

- De comportamiento reológico.

El sistema de apagado en balsa produce cales de mayor viscosidad a 3 meses de envejecimiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dejar constancia de su agradecimiento al Foro Italiano Calce, por permitirles participar en el workshop organizado en Zone. Asimismo agradecer a la Generalitat de Catalunya por el financiamiento obtenido en el proyecto GICITED 2009 SGR 878, y al Ministerio de Educación y Ciencia (Spain), por el proyecto FIS2008-06335-C02-01.

PROFILO AUTORI

Joan Ramon Rosell, Architetto Tecnico, Ingegnere in processi industriali e Direttore del Laboratori dei Materiale della EPSEB; **Laia Haurie**, Dottoressa in Chimica; **Montse Bosch**, Architetto Tecnico e Laureata in Scienze Umane; **Inma R. Cantalapiedra**, Dottore in Fisica e Architetto Tecnico.

Sono membri del Gruppo Interdisciplinare di Scienza e Tecnologia per la Costruzione (GICITED) e lavorano e insegnano presso la Scuola di Ingegneria delle Costruzioni a Barcellona e all'Università Politecnica della Catalogna (UPC). Il gruppo di ricerca sta sviluppando progetti relativi ai materiali da costruzione, dai prodotti di base all'applicazione della scienza e dei metodi diagnostici di costruzione, manutenzione e intervento nel patrimonio architettonico.

Andrea Rattazzi, laureato in Scienze Geologiche, vive a Bologna dove esercita attività di ricerca e consulenza scientifica per la conservazione e il restauro del patrimonio culturale. Dal 1996 al 2006 lavora presso i laboratori scientifici della Fondazione Cesare Gnudi, dove assume il ruolo di direttore nell'ultimo triennio. E' professore a contratto alla Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio - DiAP Politecnico di Milano, titolare dell'insegnamento di "Chimica dei materiali". Partecipa ai lavori ed è referente del GS Malte dell'UNI-Beni Culturali. E' presidente del Forum Italiano Calce e socio fondatore de "la Banca della Calce".

Anexo 5 Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento.

Publicado: Materiales de Construcción; ISSN: 0465-2746; Vol 61; No 301; (2011)

Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento

Simple method of dynamic Young's modulus determination in lime and cement mortars

J. R. Rosell^(*), I. R. Cantalapiedra^(*)

Recepción/Received: 10-VII-09
Aceptación/Accepted: 17-XII-09
Publicado online/Online publishing: 15-VII-10

RESUMEN

El presente trabajo muestra un método simple para determinar el módulo de Young dinámico (MOE) a partir de pequeñas perturbaciones mecánicas producidas a probetas de mortero de cal y de cemento, correlacionando los resultados obtenidos con las correspondientes mediciones realizadas con otras técnicas.

El procedimiento sigue básicamente las instrucciones fijadas en la Norma UNE-EN ISO 12680-1 (8) de productos refractarios, pero aplicándolo a probetas normalizadas RILEM 4x4x16 cm de morteros confeccionados con cal y cemento.

Paralelamente se realizan determinaciones del MOE a partir de la velocidad de paso de impulsos ultrasónicos y determinaciones del módulo de Young estático a partir de ensayos de flexión convencionales.

La simplicidad del método aplicado y la correlación de los resultados obtenidos con las variables medidas permiten concluir que esta metodología es de aplicación directa para determinar la deformabilidad bajo carga de los morteros a partir de probetas normalizadas.

Palabras clave: cal, mortero, módulo de Young, END-ensayo no destructivo.

SUMMARY

The present work explains a simple method to determine the dynamic Young module (MOE) by inducing a set of small mechanical perturbation to samples of lime and cement mortars and correlating the results obtained with results determined using other techniques and methods.

The procedure described herein follows the instructions stated in the UNE-EN ISO 12680-1(8) standard for refractory products although in this study the instructions are applied to standardized RILEM 4x4x16 cm test samples made of lime and cement mortars.

In addition, MOE determinations are obtained by using ultrasonic impulse velocity while static Young's modulus determinations are obtained by performing conventional bending tests.

The ability of this procedure to correlate with results from other techniques, along with its simplicity, suggests that it can be widely adapted to determine the deformability of mortars under load using standardized samples.

Keywords: lime, mortar, Young's modulus, NDT-non destructive test.

^(*) Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España).

Persona de contacto/Corresponding author: joan.ramon.rosell@upc.edu

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de los trabajos de restauración de edificaciones, resulta de especial interés conocer el comportamiento deformacional bajo tensión de los morteros. Por ejemplo, determinados morteros hacen rígidos en exceso los elementos edificatorios y, en consecuencia, varían el comportamiento estructural del conjunto (1).

Así, uno de los parámetros fundamentales en la resistencia de materiales y especialmente entre los materiales de construcción es el módulo de Young, que se obtiene a partir del cociente que relaciona la tensión unitaria aplicada y la deformación unitaria obtenida en su tramo elástico-lineal, en un proceso de variación de estado tensional.

Los métodos habituales que se realizan en laboratorio para determinar dicho módulo se basan en ensayos estáticos que permiten medir con precisión tensiones y deformaciones, o en la aplicación de ondas acústicas que determinan el módulo dinámico de una forma simple y económica.

Otro grupo de técnicas de ensayo, basadas en la aplicación de ondas acústicas generadas a partir de impactos, han sido utilizadas con éxito en otros campos como el de la madera (2, 3), los hormigones (4, 5) y los polímeros (6).

Estos ensayos no destructivos evitan las roturas del material o de las probetas confeccionadas para su estudio, proporcionando un conjunto de resultados interesantes por sí mismos y para su contraste en la estimación de otros parámetros del material.

Para algunos materiales específicos, como la piedra natural (7) y los productos refractarios (8), existen normas para determinar su módulo de Young dinámico (MOE) a partir de la aplicación de técnicas de análisis de su frecuencia propia de resonancia. Sin embargo, en el campo de los morteros esta acción de normalización no se ha producido.

El objetivo principal de este artículo es validar una metodología de ensayo no destructivo, en su aplicación a los morteros comunes de cal y cemento.

2. MATERIALES Y ENSAYOS

El presente trabajo proporciona unos primeros resultados que permiten valorar la aplicación de un ensayo no destructivo basado en el análisis de la frecuencia de resonancia en el ámbito de los morteros. Dicho ensayo se ha realizado a partir de unos elementos muy simples y económicos.

1. INTRODUCTION

In the field of building restoration works, it is especially relevant to know how mortars behave under stress. For instance, some mortars stiffen up buildings, and therefore, they modify their structural behavior as a whole (1).

Thus, one of the fundamental parameters in the resistance of materials, especially those used in construction, is the Young's modulus, which is the ratio of stress to the strain obtained in the linear elastic span through a range of variations in the tensional state.

The methods for determining the mentioned modulus that are usually employed in the laboratory are based upon static tests which accurately measure stress and strain, or on acoustic waves which determine the dynamic modulus in a simple and inexpensive manner.

Another set of techniques, based on the application of acoustic waves proceeding from impacts, has been successfully used in other fields such as the study of woods (2, 3), concretes (4, 5) and polymers (6).

These non-destructive tests prevent the breaking of the material or the samples, and they provide a set of results which are not only interesting in themselves, but they can also be used to estimate other materials' parameters.

For some specific materials, like natural stones (7) and refractory products (8), there are norms for the determination of their dynamic Young modulus (MOE) that use analysis techniques based on the material's own resonance frequency. However, no norms for mortars exist in this sense.

This research attempts to validate a non-destructive test methodology for common lime cement mortars.

2. MATERIALS AND TESTS

The present work provides some preliminary results for evaluating the application of a non-destructive test based on the analysis of the resonant frequency in mortars. The test has been performed with very simple and inexpensive equipment.

Para este fin, se han ejecutado diferentes ensayos:

- Ensayo de determinación del MOE por excitación de la vibración por impacto y posterior análisis de la frecuencia fundamental de resonancia.
- Ensayo de determinación del MOE a partir de la velocidad de paso de impulsos ultrasónicos.
- Ensayo de flexión estática para obtener el tramo lineal de la gráfica tensión-deformación.

Los resultados de ambos MOE se han alcanzado bajo presunciones necesariamente simplificadas, dado que las expresiones utilizadas en los cálculos de módulo de Young son válidas en medios isotropos y homogéneos, mientras que el mortero de cal no cumple estrictamente esta condición.

2.1. Morteros a ensayar

El ensayo de análisis de la frecuencia de resonancia, se aplica sobre probetas normalizadas según RILEM de formato 4x4x16 cm. Los morteros realizados son de 8 tipologías diferentes según la dosificación de los conglomerantes y de las arenas (Tabla 1).

Several tests have been run for that purpose:

- MOE (dynamic elasticity modulus of elasticity) determination test by impulse excitation of vibration and the subsequent analysis of the resonant basic frequency.
- MOE determination test from the velocity at which ultrasonic impulses propagate through the sample.
- Static flexural test to obtain the linear region of the stretch-deformation graph.

The results on both MOE have been obtained using necessarily simplified assumptions since the expressions used in the estimation of the Young's modulus are valid in both isotropic and homogeneous media, whereas lime mortars do not comply strictly with this condition.

2.1. Mortars to be tested

The resonance frequency analysis test is applied on standard 4x4x16 cm RILEM samples. The studied mortars belong to eight different categories depending on the dosage of binders and sands (Table 1).

Tabla 1 / Table 1
Nomenclatura y dosificaciones.
Nomenclature and dosages.

Código / Code		Conglomerantes / Binders			Áridos / Aggregates		Agua / Water
		CL 90-S	NHL 3.5	CEM I 42.5	600 µm	3600 µm	Agua/sólido / W./sol
NHL3.5	1:2.7-600		1		2.7		0.19
NHL3.5	1:4-600		1		4		0.19
NHL3.5	1:2.7-3600		1			2.7	0.15
NHL3.5	1:4-3600		1			4	0.14
CC	1:2.7-600	0.6		0.4	2.7		0.24
CC	1:4-600	0.6		0.4	4		0.22
CC	1:2.7-3600	0.6		0.4		2.7	0.20
CC	1:4-3600	0.6		0.4		4	0.18

Se utilizan dos tipos de conglomerantes: cal hidráulica NHL 3,5 y la mezcla de cal aérea CL 90-S más cemento Portland CEM I 42,5; y dos mezclas de áridos comerciales de origen calcáreo de curvas granulométricas ajustadas a Fuller, que responden a la composición especificada en la Tabla 2.

Two types of binders have been used: hydraulic lime NHL 3.5 and a mix of air lime CL 90-S with portland cement CEM I 42.5 and two mixtures of commercial calcareous aggregates with adjusted Fuller curves, corresponding to the specified composition stated in Table 2.

Tabla 2 / Table 2
Composición mineralógica de los áridos.
Mineralogical composition of aggregates.

Designación áridos / Aggregates designation	Tamaño máximo (mm) / Max size (mm)	CO ₃ Ca	MgCO ₃	Fe ₂ O ₃	Insolubles en CIH / Insoluble in CIH
600 µm	0.6	≥ 98%	< 0.8%	< 0.05%	< 0.8%
3600 µm	3.6	≥ 99%	< 0.3%	< 0.02%	< 0.2%

La cantidad de agua para el amasado se ha definido por un asentamiento en mesa de sacudidas de 155 ± 5 mm según Norma (9) y el proceso de curado ha seguido el siguiente calendario:

- 7 días en ambiente saturado en cámara húmeda (HR > 95% y 20 ± 2 °C).
- 21 días en ambiente de laboratorio (HR 50% \pm 5 y 20 ± 2 °C).
- Secado en estufa a 60 °C hasta peso constante.

2.2. Determinación de los módulos de Young

Se determina el peso de cada probeta con una balanza de precisión de 0,01 g y las mediciones de su longitud, anchura y espesor mediante un calibrador (tipo pie de rey de precisión 0,01 mm) para así hallar la densidad aparente de cada uno de los tipos de mortero que conforman las probetas.

• MOE longitudinal por impacto (MOE_{long})

La tarea principal es la obtención del modo fundamental de la frecuencia propia de resonancia, mediante la aplicación de un impulso instantáneo (golpeo) sobre la probeta y la recogida de la señal o espectro de frecuencias que este golpeo produce. La señal se analiza mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) con la ayuda de un software adecuado.

En la Figura 1 vemos el esquema del equipo, coincidente con el diagrama de bloques del dispositivo según Norma (8).

The quantity of kneading water has been determined by a settlement in a 155 ± 5 mm shaking table according to standard (9), and the curing process has followed this schedule:

- *7 days in a saturated environment in a wet chamber (R.H. >95% and 20 ± 2 °C).*
- *21 days in laboratory environment (RH 50% \pm 5 and 20 ± 2 °C).*
- *Drying in a mould dryer at 60 °C until even weight has been reached.*

2.2. Young's modulus determination

The weight of each sample is determined by a precision balance of 0.01 g. The length, width, and thickness are determined by using a gauge (such as the slide-gage of 0.01 mm) in order to find out the apparent density of each of the mortar types of the samples.

• Longitudinal MOE by impact (MOE_{long})

The most important task is to obtain the fundamental mode resonant frequency when the specimen is subjected to an instantaneous pulse (beating) and to register the signal or the frequency spectrum that this beating produces. The signal is analyzed by Fast Fourier Transform (FFT) with adequate software.

Figure 1 shows the equipment used, matching the diagram of blocks of the device as shown in (8).

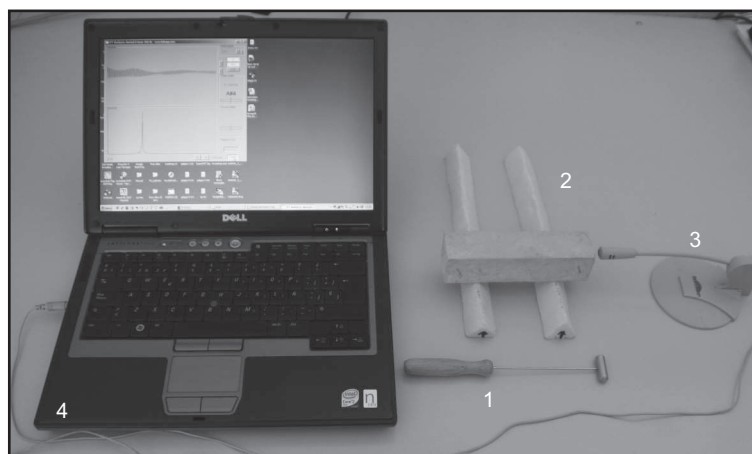


Figura 1. Equipo para determinar MOE por impacto.
Figure 1. Equipment for determining MOE by impact.

Siguiendo dicho esquema el dispositivo consta de:

1. Elemento o martillo percutor: su punta puede ser de acero o madera dura y su peso debe ser tal que evite

As the diagram shows, the device is composed of:

1. *A plexor with an end made of steel or hardwood; its weight has to be suitable for preventing a physical*

un desplazamiento físico de las probetas en el momento del golpeo; se considera un peso aproximado del martillo percutor de un 5% del peso de la probeta.

2. Elementos de soporte de las probetas o muestras a ensayar: los soportes ejercen una importante función, ya que aíslan las probetas de mortero de las vibraciones externas y, según su colocación, definen el modo de vibración de las muestras (Figura 2a). Los soportes utilizados son de poliestireno extrusado de densidad 35 kg/m³, en forma de prisma triangular de 3 cm de lado.

movement of the specimens when the beating is produced. Appropriate plexor weight has to be 5% of the specimen weight.

2. Items for supporting the specimens or test samples. The role of the holders in this method is very important since they isolate mortar specimens from external vibrations and their position defines the vibration mode of the samples (Figure 2a). The holders being used are made of triangular prisma-shaped extruded polystyrene of 35 kg/m³ density and with sides of 3 cm.

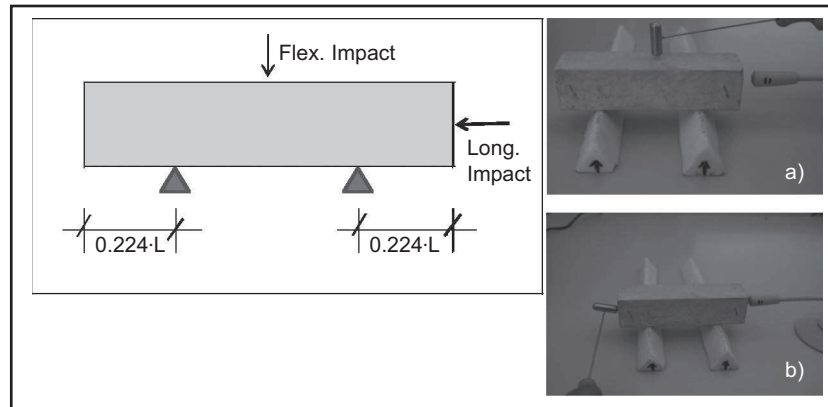


Figura 2. Esquema de la disposición de los apoyos y las zonas de impacto (a) para MOE_{flex} , y (b) para MOE_{long} .
Figure 2. Image of the position of holders and impact zones (a) for MOE_{flex} , and (b) for MOE_{long} .

3. Elemento de captación de señal (micrófono): utilizaremos transductores de señal sin contacto para evitar posibles errores de medición causados por las vibraciones parásitas que puedan generarse por pequeños desplazamientos en las probetas. Estos transductores se colocan en los puntos de antinodo a una distancia entre 3 y 10 mm de la superficie de la probeta.

Las lecturas se realizan en condiciones climáticas de laboratorio (20 ± 2 °C; $60 \pm 10\%$ HR) y en condiciones de ausencia de ruidos estridentes, pero sin especiales restricciones de silencio.

4. Sistema de tratamiento de la señal: consta de acondicionador/amplificador de señal y software de análisis del espectro obtenido.

3. Signal register device (microphone). Non-contact signal transducers have been used in this study in order to prevent miscalculations caused by the flutters that could be generated by the slightest movement of the samples. The transducers must be placed in the antinode points 3 to 10 mm away from the surface of the sample.

The readings are taken at room temperature (20 ± 2 °C; $60 \pm 10\%$ HR) in the absence of loud noises, but without any special sound restriction conditions.

4. Signal processing system. This is composed of: signal conditioner/amplifier and software for the analysis of the obtained spectrum.

A partir del valor de la frecuencia fundamental de resonancia correspondiente, f en Hz, de la longitud de onda del primer armónico, $2L$ en m, obtenemos la velocidad de la pulsación, v en m/s [1]

From the value of the corresponding resonant frequency, f given in Hz, of the first harmonic's wavelength, $2L$ in m, we can obtain the pulse velocity, v in m/s [1]

$$v = 2Lf \quad [1]$$

L = longitud de la probeta (0,160 m) / L = sample's length (0.160 m)

f = frecuencia fundamental de resonancia / f = resonance frequency

y utilizando el valor de la densidad, ρ en kg/m^3 , calculamos el valor del MOE_{long} [2]

$$\text{MOE}_{\text{long}} = \rho v^2 \quad [2]$$

ρ = densidad de la probeta / ρ = density

El valor utilizado como frecuencia de resonancia es el valor medio de seis lecturas obtenidas consecutivamente con una diferencia máxima entre ellas del 1%.

• MOE flexión por impacto (MOE_{flex})

Consecutivamente se realizan lecturas de las frecuencias de resonancia a flexión (Figura 2a) apoyando las probetas en la cara correspondiente al fondo del molde (cara 1), girándolas 90 grados y apoyadas en una cara lateral del molde (cara 2). Se siguen las especificaciones descritas en la norma (8), referentes a condiciones de los apoyos, cálculos de resultados, etc. Se ha supuesto un coeficiente de Poisson de 0,22.

• MOE longitudinal por ultrasonido (MOE_{us})

Para esta determinación se ha utilizado un equipo de emisión-recepción de ultrasonidos C368 de Matest, provisto de palpadores de contacto receptor-transmisor de 55 kHz. Las lecturas de tiempo de paso se han realizado en sentido longitudinal de la probeta.

Se ha determinado la velocidad de paso (v_{us}) [3]

$$v_{\text{us}} = L/t \quad [3]$$

L = longitud de la probeta (0,160 m) / L = sample's length (0.160 m)

T = tiempo de paso (s) / T = time it takes the ultrasonic waves to go through the sample (s)

Se ha determinado el MOE longitudinal por ultrasonido a partir de la expresión (10) [4]:

$$\text{MOE}_{\text{us}} = \rho (1+\mu)(1-2\mu) v_{\text{us}}^2 / (1-\mu) \quad [4]$$

μ = Coeficiente de Poisson / μ = Poisson coefficient

• Módulo de Young estático por flexotracción, E

Para determinar el módulo de Young estático se ha procedido a instrumentar las probetas con galgas extensométricas y a ensayarlas a flexión, procediendo mediante

and using the density value, ρ en kg/m^3 , it is possible to calculate the MOE_{long} value: [2]

The value we use as resonant frequency is the average value of six successive readings obtained with a maximum difference of 1% between them.

• Flexural MOE (MOE_{flex}) by impact

Holding the specimens in the corresponding face to the bottom of the mould (face 1), and rotating them 90 degrees and holding them in a lateral side of the mould (face 2), successive readings of the flexural resonant frequencies are made (Figure 2a). Specifications described in standard (8) referring to the conditions of the holders, results calculations, etc., have been followed. It is considered a 0.22 Poisson's ratio.

• Longitudinal MOE (MOE_{us}) by ultrasound

A transmitting and receiving appliance of ultrasound C368 made by Matest, was used for this determination. This appliance has 55 kHz transceiver sensors. The time it takes the ultrasonic pulse to go through the test sample in the longitudinal direction has been measured.

The velocity of the longitudinal propagation of ultrasonic waves through the specimen (V_{us}) has been determined as [3].

Longitudinal MOE by ultrasound has been calculated with the expression (10) [4]:

• Static Young modulus by flexotraction, E

The procedure to determine static Young's modulus has been to manipulate specimens with strain gauges and carry out flexural tests by means of load increments until

pequeños incrementos de carga hasta la estabilización de las señales correspondientes de tensión de tracción y de deformación unitaria (σ , ϵ). La regresión lineal en la zona inicial del gráfico tensión-deformación permite determinar el módulo de Young.

Para facilitar una mayor zona de flexión pura constante se ha procedido mediante un sistema de aplicación de carga en dos puntos (Figura 3).

stabilization of tensile strength and strain (σ , ϵ) signal is attained. Linear regression in the initial zone of the stress-strain graph allows determining the Young's modulus.

With the purpose of facilitating a larger flexural zone, pure and constant, a proof loading system in two points has been used (Figure 3).

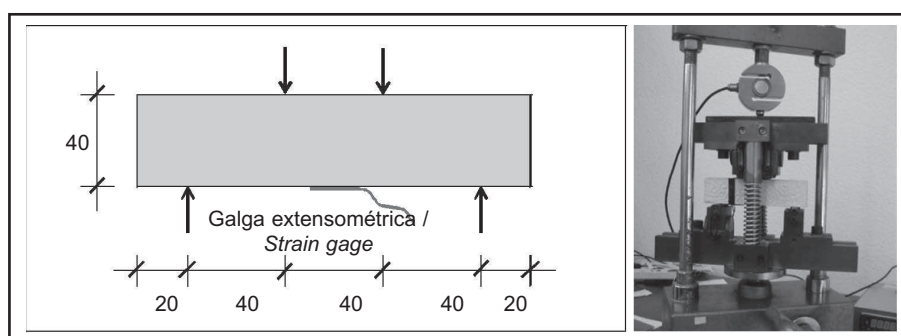


Figura 3. Esquema de los puntos de aplicación de carga y apoyos.
Figure 3. Image of the load and support working points.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se exponen los resultados obtenidos de los END (ensayos no destructivos), para la determinación del MOE. Se han omitido los errores absolutos calculados para las determinaciones de los MOE_{long} y MOE_{flex} , dado que sólo en una probeta se ha superado el valor del 1%.

Los valores de los coeficientes de variación (C.V.) expresados en % de los resultados de cada amasada, inferiores en general al 5%, acreditan la homogeneidad de las probetas y la bondad de las mediciones realizadas. Los resultados más dispersos, entre el 5 y el 18%, corresponden al módulo de Young estático, como era de esperar dada la mayor sensibilidad a los efectos locales que presenta el procedimiento estático.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Table 3 presents the results of the non-destructive tests for the MOE determination. Absolute errors for the MOE_{long} and MOE_{flex} determination have been omitted since only in one specimen the value exceeded 1%.

Values of the coefficients of variation expressed in % (C.V.%) for the results of each mixture, in general lower than 5%, prove the specimens' homogeneity and the reliability of the measurements. The more dispersed results, between 5-18%, belong to the static Young's modulus, as it was expected since the static procedure is more sensitive to local effects.

Tabla 3 / Table 3
Resultados correspondientes a los diferentes MOE y al módulo de Young estático.
Results corresponding to the different MOEs and the static Young modulus.

Código / Code		MOE_{flex} (MPa)	% C.V. MOE_{flex}	MOE_{long} (MPa)	% C.V. MOE_{long}	MOE_{us} (MPa)	% C.V. MOE_{us}	Eflex (MPa)	% C.V. Eflex.
NHL3.5	1:2.7-600	7794	4.7	7678	10.0	8183	7.0	8666	15.6
NHL3.5	1:4-600	4515	2.1	4112	4.9	5221	0.5	4990	7.3
NHL3.5	1:2.7-3600	10321	3.4	9809	1.8	11114	2.5	9990	8.0
NHL3.5	1:4-3600	8287	2.9	7835	1.5	9302	2.8	8196	5.2
CC	1:2.7-600	9529	3.0	9839	0.8	10462	2.3	9000	14.7
CC	1:4-600	7726	1.1	8011	0.9	9051	1.8	9567	10.9
CC	1:2.7-3600	13177	1.3	14059	2.0	14274	3.2	12927	5.5
CC	1:4-3600	13230	2.2	13677	3.0	16137	4.7	12894	17.6

En la Figura 4 se muestra el resultado de correlacionar el MOE_{long} con el MOE_{flex} . Se constata la precisión y correlación entre ambos tipos de determinaciones.

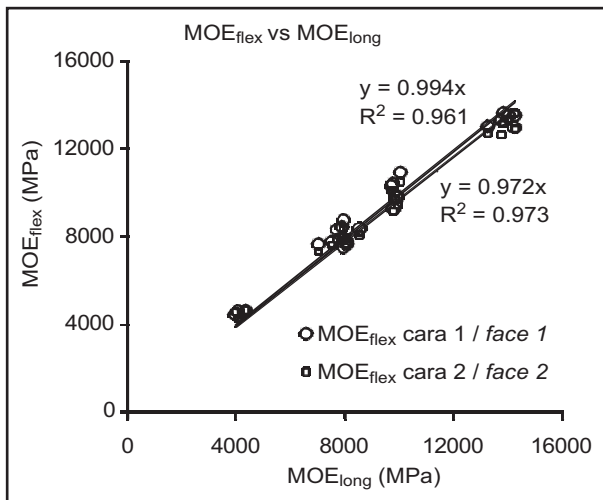


Figura 4. Correlación entre MOE_{long} y MOE_{flex} .
Figure 4. Correlation between MOE_{long} and MOE_{flex} .

Figure 4 shows the results of correlating MOE_{long} with MOE_{flex} . The precision and correlation between both types of determinations can be confirmed.

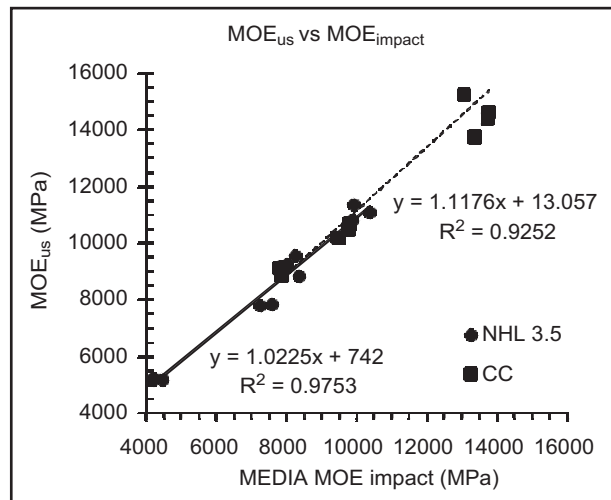


Figura 5. Correlación entre $MOE_{impacto}$ y MOE_{us} .
Figure 5. Correlation between MOE_{impact} and MOE_{us} .

Asimismo, en la Figura 5 se comparan los resultados obtenidos por impacto MOE_{impact} (media MOE_{long} y MOE_{flex}) con los determinados por velocidad de paso de ultrasonidos. Se constata la excelente correlación (R^2 de 0,97 y 0,92), si bien se observa que los valores obtenidos por ultrasonidos son superiores (2 y 12%) a los de impacto.

Del análisis comparado de los resultados en conjunto (Figura 6) podemos destacar la gran correlación entre los resultados del módulo de Young por flexión con los MOE por impacto o por ultrasonidos (R^2 de 0,94 y 0,92).

In addition, Figure 5 shows a comparison of the results obtained by impact MOE_{impact} (average MOE_{long} and MOE_{flex}) to those determined by the velocity at which ultrasonic waves propagate. The correlation is excellent (R^2 of 0.97 and 0.92) although the values obtained by ultrasound are clearly higher (2 and 12%) than the impact ones.

From the comparative analysis of all the results (Figure 6), it is possible to highlight the high correlation between flexural Young's modulus and MOE by impact and ultrasound (R^2 of 0.94 and 0.92).

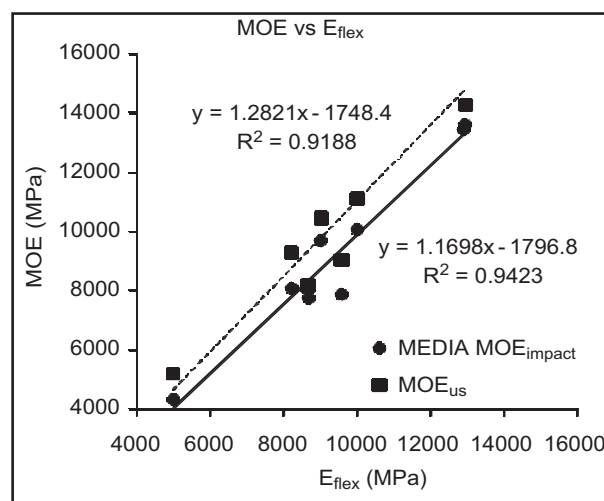


Figura 6. Relación entre los MOE determinados y E_{flex} .
Figure 6. Relation between the determined MOEs and E_{flex} .

En los casos estudiados se pueden establecer relaciones lineales entre ambos métodos que responden a las expresiones: [5] [6]

$$MOE_{\text{impact}} = 1.17 \cdot E - 1800 \quad [5]$$

$$MOE_{\text{us}} = 1.28 \cdot E - 1750 \quad [6]$$

4. CONCLUSIONES

El método de medida del módulo de Young dinámico por excitación de vibración por impacto (MOE) resulta extraordinariamente simple. Aplicado a los morteros citados, ha permitido obtener resultados correlacionables con el otro sistema dinámico estudiado (MOE por ultrasonido) y con la determinación del módulo de Young estático a partir de ensayo de flexotracción.

Las probetas normalizadas RILEM 4x4x16 cm utilizadas en los ensayos mecánicos comunes son apropiadas para medir el MOE.

La facilidad de ejecución y la fiabilidad de las medidas, asociadas al bajo coste del equipo (un ordenador común más un micrófono), permiten pensar en una aplicabilidad extendida como herramienta de control en industrias fabricantes de morteros. También posibilita con mayor facilidad que se caractericen los morteros por su deformabilidad y no sólo por su resistencia mecánica.

Asimismo, el estudio ha permitido mostrar que, basándose en el módulo de Young dinámico obtenido experimentalmente en laboratorio para los materiales ensayados, puede encontrarse una correlación expresada en forma de una función analítica que permite determinar el correspondiente módulo estático.

Constatamos que el MOE_{impact} estima con mayor precisión la deformabilidad del material que el MOE_{us} , dado que las longitudes de onda generadas por la perturbación son muy superiores a las discontinuidades, lo que minimiza el efecto de no homogeneidad del material estudiado.

AGRADECIMIENTOS

A las empresas Cales de Pachs, Omya Clariana, Alfredo Pérez y Parex Morteros, por su colaboración en este trabajo.

El estudio ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (España), bajo los proyectos FIS2005-06912-C02-01, FIS2008-06335-C02-01 y FIS2006-11452-C03-02 y por la Generalitat de Catalunya (España) con el proyecto 2009 SGR 878.

In the cases studied, it is possible to establish linear relations between both methods that respond to the following expressions: [5] [6].

4. CONCLUSIONS

The measurement method of the dynamic Young's modulus by impulse excitation by vibration is extraordinary simple to use. When applied to mortars, it is possible to obtain results that correlate with the other dynamic system studied (MOE by ultrasound) and with the determination of the static Young's modulus from the flexotraction test.

Standardized specimens RILEM 4x4x16 cm used in the ordinary mechanical tests are suitable to measure the dynamic modulus of elasticity.

The simplicity of the procedure as well as the reliability of the values obtained in the measurements, related to the low-cost of the equipment used (a simple computer and a microphone), suggest that this can be a methodology widely applied as a control tool in mortar producing companies. It also makes it possible to characterize mortars more easily by their strain behaviour and not just by their mechanical resistance.

Also, the study has made it possible to prove that, by studying the dynamic Young's module obtained experimentally in the laboratory, it is possible to find a correlation expressed as an analytical function that makes it possible to determine the corresponding static modulus.

We have verified that MOE_{impact} estimates the strain of the material more accurately than MOE_{us} , since the wavelengths generated by the vibration are much higher than the discontinuities, which minimizes the effect of non-homogeneity in the material under study.

AKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the following companies for their support in this study: Cales de Pachs, Omya Clariana, Alfredo Pérez y Parex Morteros.

This study has been financed by the Ministerio de Educación y Ciencia (Spain) as part of the FIS2005-06912-C02-01, FIS2008-06335-C02-01 y FIS2006-11452-C03-02 projects, and by the Generalitat de Catalunya (Spain) as part of the 2009 SGR 878 project.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) ICCROM: "Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. Mortiers ciments et coulis utilisés dans la conservation des bâtiments historiques"; Symposium 3-16, Roma (1982).
- (2) Ricardo, M. y Baettig, P.: "Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales", *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 3(1-2), pp. 44-51 (2001).
- (3) Fakopp: Acoustic tomography for tree evaluation, www.fakopp.com
- (4) Nagy, A.: "Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method", *J. Mater. Civ. Eng.*, 9(1), 15-20 (1997). doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:1(15)
- (5) "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration", ASTM Standard E1876-01, (2001).
- (6) Schmidt, R.; Wicher, V.; Tilgner, R.: "Young's modulus of Gouling compounds measured with a resonante method", *Polymer Testing*, vol. 24, 197-203 (2005). doi:10.1016/j.polymertesting.2004.08.010
- (7) Norma UNE-EN 14146: "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental)" (2004).
- (8) Norma UNE-EN ISO 12680-1: "Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso" (2007).
- (9) Norma UNE-EN 1015-3: "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)" (2000).
- (10) Hernández, M. G.; Anaya, J. J.; Izquierdo, M. A. G.; Ullate, L. G.: "Application of micromechanics to the characterization of mortar by ultrasound", *Ultrasonics*, vol. 40 (2002).

* * *

Anexo 6 Algunas consideraciones sobre la cal y sus morteros.

Publicado: II Jornadas Fical; Ed. UPC-Grup de Recerca GICITED; Bcelona; Ene.
2012

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA CAL Y SUS MORTEROS

¹Rosell i Amigó, J.R.

¹Laboratori de Materials EPSEB-UPC

joan.ramon.rosell@upc.edu

ABSTRACT

El texto que se presenta a continuación pretende clarificar algunos conceptos relacionados con la cal y su nomenclatura con la intención de evitar algunos equívocos que, a menudo, se producen cuando en un mismo campo como es el de la construcción, se mezclan lenguajes técnicos y especializados con términos coloquiales propios del entorno de la obra.

También se pretende provocar la reflexión sobre el papel que juega el agua en los procesos de aplicación y fraguado de los morteros, ya sea éste aéreo o hidráulico y su relación con la porosidad de los materiales y, en consecuencia sus prestaciones.

Hay también un último apartado dedicado a la situación actual del sector de la construcción, con la proliferación de trabajos de restauración y recuperación del patrimonio que exigen técnicos con conocimientos específicos, operarios altamente cualificados y productos "a medida". Si las circunstancias no permiten que se den estas condiciones, la industria y el mercado acaban dando soluciones genéricas y de amplio espectro que pueden ofrecer buenos resultados.

1. Introducción

A lo largo de una ya dilatada experiencia como profesor de materiales en la Universitat Politècnica de Catalunya y como Director del Laboratori de Materials de la Escola Politècnica Superior de l'Edificació de Barcelona, he comprobado que, en paralelo a los expertos que investigan desde la universidad y la industria sobre la cal y sus procesos físico-químicos, existe también un amplio grupo de profesionales del sector, arquitectos, aparejadores, arquitectos técnicos, restauradores y los autoproclamados “maestros de la cal” que conocen la cal, que la usan en sus obras, pero que a veces se encuentran faltos, precisamente, de ciertos conocimientos específicos a la hora de tomar decisiones sobre el uso de los materiales más adecuados para actuaciones muy concretas.

Es objetivo de este documento plantear algunas reflexiones sobre este problema, entendiendo que para algún lector pueden ser conceptos bien conocidos pero que, después de las II Jornadas FICAL celebradas en Barcelona el pasado mes de abril de 2011, creemos que pueden ayudar a un mejor entendimiento de la cal, sus procesos, su semántica, y con ello colaborar en la difusión de este material tradicional que ha debido adaptarse a los “tiempos modernos” con lo que ello conlleva de industrialización, especialización, normalización y sobreinformación o, en algunos casos, falta de ella.

2. De la nomenclatura

Tradicionalmente, en el mundo de la cal, asociamos la mejor cal a aquella procedente de las piedras más blancas de la cantera y por lo tanto como la más pura. Esta consideración proviene de los primeros tratados de arquitectura. Ya en el capítulo V del segundo libro de “De arquitectura”, Marco Vitruvio expresaba la conveniencia de obtener la cal a partir de la piedra más blanca y dura. Ciertamente, antes de la industrialización, la mejor cal era la posible en cada caso: la que más fácilmente podía obtenerse en cada circunstancia a partir de la mejor piedra de los alrededores; allí donde el terreno permitiese la construcción del horno; donde fuese fácil obtener el combustible para la cocción; y en el caso de las ciudades, incluso a partir del “canibalismo” de piedras ya usadas en edificios anteriores. Por ejemplo, en la zona de la Puglia (Italia), como en tantas otras del Mediterráneo, existía una simbiosis perfecta entre el cultivo de la vid y la producción de cal: los sarmientos servían para alimentar el horno y la cal se usaba en la agricultura y para el encalado de las casas.

Aunque más adelante discutiremos esta generalización, vaya por delante que no hay, hoy por hoy, una cal mejor por excelencia si no diferentes cales, más o menos adecuadas para distintos usos y que, en consecuencia, una cal procedente exclusivamente de “piedras más blancas y puras” no tiene por qué ser, actualmente la mejor.

Algo similar ocurre con la consideración de lo que significa la incorporación de los aditivos en los procesos de fabricación y uso de la cal. Si buscamos un paralelismo con el sector alimentario, parece que un alimento sin aditivos es mejor o está más valorado. Pero también es cierto que, en alimentación, la incorporación de aditivos es una práctica habitual que, en general, sirve para

mejorar alguna de las cualidades de la materia prima, por ejemplo cuando salamos los alimentos. El problema aparece cuando el aditivo que se añade al producto sirve para aportar alguna característica que no comporta una mejora en sí o conlleva efectos colaterales indeseados, o lo que es peor, sirve para enmascarar alguna circunstancia (por ejemplo especiar en exceso un pescado para ocultar su poca frescura).

Ante esta cuestión, debemos entender el funcionamiento hoy en día de la industria de la cal: los fabricantes españoles producen cal pura que tiene destinos muy diversos: sector de la agricultura, de la siderurgia, alimentario o farmacéutico entre muchos otros. La producción de este óxido de cal muy puro (CaO), destinado a múltiples usos, es el que permite una industrialización con altas prestaciones: se produce bajo estrictos controles de calidad, con personal altamente cualificado, dotado de laboratorios, e incluso bajo parámetros sostenibilistas como el filtrado de emisiones a la atmósfera, reaprovechamiento del calor residual, una eficaz gestión de los flujos energéticos, etc.

Cuando esta cal muy pura se dirige al sector de la construcción, necesita ser transformada en los productos “de cal” propios de este sector, y por lo tanto precisa de: la incorporación de agua para convertirse en hidróxido; agua en mayor cantidad para transformarse en pasta de cal; polvo de materiales puzolánicos o hidráulicos para buscar la reacción puzolánica o hidráulica; o aditivos químicos diversos para adecuarse a las prestaciones específicas de sus diversos usos. Así pues, no podemos cuestionarnos si es comprensible y aceptable que un fabricante de productos de la cal utilice los aditivos adecuados cuando lo hace para que el material ofrezca las mejores prestaciones para cada uso.

El problema presente se da por la consideración generalizada de que lo que es natural, puro, sin aditivos, es mejor que lo artificial. A menudo, quienes defienden estas posturas son los que añaden ciertos “elementos” para determinados usos en función de su “maestría” y consideran que no es lo mismo añadir paja, sangre, arcilla o chamota (productos “naturales”)¹, que adicionar fibras de polipropileno, aditivos espumantes, humo de sílice o metacaolín.

También, cuando hablamos de una cal hidráulica natural, ésta se considera mejor que una cal hidráulica artificial cuando no tiene porqué ser así. La diferencia entre ambas cales está en el origen de sus componentes: mientras que en la cal hidráulica natural la proporción entre los diferentes componentes se da en la materia prima de la que se obtiene (es decir la piedra de cantera), en la cal hidráulica artificial la dosificación de cal pura y sílice se consigue a partir de materias primas que contienen, básicamente, alguno de los componentes (piedra caliza pura y arcillas). Esta dosificación “artificial” permite, como es lógico, una homogeneidad y constancia del producto mayor que la de la cal hidráulica natural, ya que en ésta, la dosificación depende de la beta de la cantera de la que se extrae la piedra caliza. En consecuencia, la cal hidráulica artificial no es “per se” ni mejor ni peor que la natural, tan sólo se produce de manera diferente.

1. O el nopal, extraído de los cactus y usado por las culturas precolombinas para mejorar la adherencia en morteros.

Finalmente, y relacionado también con la semántica se encuentra la connotación peyorativa que tiene el término “bastardo”. Según el diccionario de la RAE: **bastardo**: *es aquello que degenera de su origen o naturaleza*. Cuando nos referimos a un mortero bastardo sencillamente hablamos del uso de dos conglomerantes que suelen ser yeso y cal o cal y cemento, y en consecuencia es un mortero mixto, ni mejor ni peor: por lo tanto el término “bastardo” es inadecuado. Existe una amplia variedad de técnicas tradicionales y usos de morteros mixtos a partir de, por ejemplo, la adición de chamota ya en época romana (“cocciopesto” en italiano), cuando se buscaba un mortero hidráulico.

3. Fraguado y endurecimiento de cal aérea y cal hidráulica

A menudo se dice que la diferencia entre un conglomerante aéreo y uno hidráulico radica en la capacidad que tiene el segundo para endurecer inmerso en agua, cuando en realidad esto es una consecuencia. Es necesario, por lo tanto, explicar el mecanismo fundamental del proceso porqué, aunque en ambos casos se requiere la incorporación de agua a la mezcla como vehículo para hacer la pasta o el mortero, los procesos químicos son diferentes.

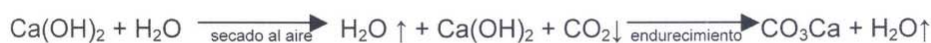
Tradicionalmente se ha obtenido la cal (óxido de cal CaO) del proceso de calcinación del carbonato cálcico que se encuentra en la naturaleza en forma de piedras calizas más o menos puras²:



Cuando añadimos agua (H₂O) al óxido de cal que tenemos en forma de piedra calcinada (cal viva), obtenemos el hidróxido de cal Ca(OH)₂, también llamado cal apagada o cal hidratada, además de un aumento de volumen y desprendimiento de calor:



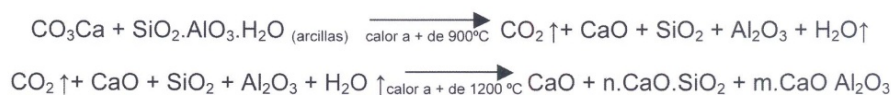
En este proceso conocido como apagado obtenemos, en función de la cantidad de agua añadida, la cal en polvo o en pasta. Con el añadido de árido y agua, si procede, obtenemos el mortero que, durante su proceso de secado desprende el agua por evaporación al tiempo que capta el CO₂ de la atmósfera, que será el que reaccione con el hidróxido de cal formando de nuevo el carbonato cálcico y generando más agua, que se pierde por evaporación.



Este es por lo tanto un fraguado aéreo, dado que la cal aérea necesita desprenderse del agua de amasado y capturar dióxido de carbono del aire, lo que no puede hacer si se encuentra sumergida.

2. Nota: no se han considerado en este texto las cales distintas a las cales cálcicas (CL) por cuestiones de simplificación.

Ahora bien, si trabajamos a partir del carbonato cálcico CO_3Ca , y le añadimos arcillas, que contienen mayormente y en proporciones variables sílice y alúmina y en menor cantidad otros elementos como óxidos de hierro, y elevamos la temperatura de cocción alrededor de los 1200°C conseguimos la producción de la cal hidráulica. Las ecuaciones siguientes muestran el proceso químico:



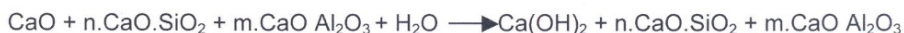
Siendo

CaO : cal viva;

$n \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: silicatos cálcicos

$m \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$: Aluminatos cálcicos

Como podemos observar, este producto presenta una importante cantidad de cal viva que debe ser apagada selectivamente para formar cal aérea apagada.



Así, típicamente, en un saco de cal hidráulica se encuentran compuestos de cal aérea (que tendrán un fraguado aéreo) y compuestos hidráulicos (a los que corresponderá un fraguado hidráulico), además de otros componentes inertes.

Al utilizar esta cal hidráulica para la confección de una pasta o un mortero, precisaremos añadir el agua necesaria para el amasado. Ésta provocará la hidratación de los compuestos hidráulicos mientras que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ precisará la evaporación del agua sobrante y la captura del CO_2 para su endurecimiento. Se dan así dos procesos: uno hidráulico que sólo requiere la presencia del agua, y el otro aéreo, que requiere el acceso del aire.

En resumen: un conglomerante aéreo precisa de aire para su completo fraguado y endurecimiento, mientras que un conglomerante hidráulico puede fraguar y endurecer completamente al aire, y tan sólo parcialmente en inmersión,

4. ¿Qué significa una dosificación 1:2?

Las dosificaciones de los morteros se dan, habitualmente, a partir de las expresiones 1:2 o 1:3 y con ello parece que quedan definidas las partes de conglomerante y arena que lo componen aunque, como veremos, no siempre es así.

Tradicionalmente, esta expresión relacionaba volúmenes, más concretamente el "volumen aparente" de conglomerante y de arena, y la cantidad del tercer componente del mortero, que sería el agua, no quedaba indicada. Así podemos comprobarlo cuando se consultan los manuales y tratados de construcción desde Vitruvio, pasando por Alberti y hasta Benito Bails [1]:

Por lo que mira a la proporción de la cal con la arena que se le ha de añadir, oiremos a Paladio (3), quien repite lo que ya tenían prevenido Vitruvio (4) y Alberti (5). "Para amasar la cal con arena, dice Paladio, se ha de hacer de este modo: tomando arena de hoyo, se echarán tres partes de ella, y una de cal." Pero oigamos también a Fray Lorenzo (6). "Prevenida la arena y la cal, irás mezclando en esta forma; si la arena es de río, se echarán dos de arena, una de cal; y si es arena de mina a cinco de arena dos de cal, echando una vez dos de arena y una de cal, y otra vez tres de arena y una de cal (...) mas en esto sigue el consejo de los experimentados.

Tableau de la composition d'un metre cube de quelques mortiers.

CHAUX.	VOLUME				OBSERVATIONS.
	de chaux.	de sable.	de ciment de tuileaux.	de pouzzolane.	
	étalés par fusion. m. cub.	de rivière. m. cub.	m. cub.	m. cub.	
1. Grasse (non hydraul.).	0.370	0.950	.....	.....	Murs de clôture, fondations de bâti- ments.
2. Grasse (un peu hydr.).	0.340	.....	0.820	.....	Pavage des cours.
3. Grasse <i>id.</i>	0.250	0.940	.....	0.200	Réservoirs, etc.
4. Hydraul. (très-énerg.).	0.360	1.000	.....	0.940	Travaux dans l'eau Service des eaux et égouts de la ville de Paris, pour les constructions hy- drauliques (a).
5. Hydraul. (énergie ord.)	0.333	1.020	.....	.....	Service de la navi- gation et des ponts de Paris.
6. <i>Id.</i> (très-énerg.).	0.400	1.00	.....	.....
7. <i>Id.</i> (énergie ord.)	0.370	0.950	.....	.....
8. <i>Id.</i> (énergie ord.)	0.380	1.020	.....	.....	Maçonnerie du fort de Charenton.
9. <i>Id.</i> (énergie ord.)	0.440	1.000	.....	.....	Pour enduit <i>id.</i> Les 0 ^m ,100 de chaux sont amenés au volume de lait de chaux de 0 ^m ,340 (b).
10. <i>Id.</i> (très-maigre)	0.100	1.000	.....	.....
	par fusion.			de Bézou (Bézou).	
11. Peu hydraul. (mortier énerg.).	0.450	0.450	.....	0.450	Maçonnerie du pont-canal de l'Orb, à Béziers.
	par immersion.				
12. Hydraulique (mortier très-énergique)	0.480	1.00	.....	.....	(Chaux du Theil) travaux maritimes des ports de Cette, de Marseille, de Tou- lon, d'Alger, etc.
	en pâte.				
13. Mortier de chaux hy- draulique énergétique.	0.550	1.00	.....	.....	Proportion moyen- ne indiquée par M. Vicat, pour les bons mortiers hydr. destinés aux maçon- neries hors de l'eau.
	en pâte.				
14. Chaux hydraul. (mor- tier très-énergique).	0.65	1.00	.....	.....	Proport. moyenne indiquée par M. Vi- cat, pour les bons mortiers hydraul- iques destinés à être immergés sous une eau profonde.

(a) Les maçonneries des réservoirs recevant les eaux du puits de Grenelle, situés place de l'Estrapade, sont hourdées avec le premier de ces mortiers.

(b) Ce mortier est employé avec avantage, sur une épaisseur de 0^m,30 à 0^m,40, dans le fond d'une fondation, sur un sol douteux. Le réservoir d'eau situé rue des Amandiers repose sur une couche de 0^m,50 de ce mortier, qui finit par prendre beaucoup de consistance.

Figura 1. Tabla de composiciones de un metro cúbico de diferentes morteros extraída de J. Claudel, L. Laroque. Practique de l'art de construire. Maçonnerie, terrasse et plâtrerie. Paris : Dunod Editeur, 1863

Este sistema de dosificar es el que se ha usado habitualmente en obra dada su facilidad de medida, ya fuese a partir de paletadas, cubos o cualquier otro utensilio y más teniendo en cuenta que ni existían ni existen aún balanzas a pie de obra. No es pues hasta el siglo XIX, con la industrialización, que se dosifican los morteros relacionando pesos y volúmenes, como puede observarse en la Figura 1, y ya en la modernidad, las dosificaciones pasan a considerarse en pesos como podemos ver en el texto de Espinosa [2].

Para obras en agua dulce, 18 kilogramos de cal grasa por 100 kilogramos de puzolana compuesta, término medio de 64 partes de sílice y 36 partes de alúmina. Puede modificarse hasta 15 o 20 partes de cal cáustica por 100 de puzolana; cuando esta es pobre en principios activos, sílice, alúmina, magnesia, o sea mezclada con materias inertes....., 2 o tres kilogramos de cal más o menos sólo producen una pérdida de 6 a 7 por 100 de cohesión.

Actualmente, los fabricantes de mortero dosifican en porcentajes de peso referidos al conjunto del producto, y así por ejemplo, indican un 5% de cemento, un 10% de cal aérea y el 85% restante de áridos y algún aditivo muy minoritario.

Pero el asunto de las dosificaciones no acaba en la discusión, peso, volumen, volumen aparente o porcentajes, ya que si no se especifica claramente qué componentes forman la mezcla, ésta da unos resultados completamente distintos. Así la cal, por ejemplo, puede ser cal apagada en polvo (aérea o hidráulica) o cal en pasta, lo que conlleva diferencias en cuanto a densidades y, por lo tanto, en pesos y volúmenes. Evidentemente, esto complica suficientemente el asunto pero, si las características del árido tampoco se definen previamente, podemos encontrarnos con compacidades diversas debidas a las distintas distribuciones granulométricas y a la forma de los áridos.

En resumen, que ante una dosificación 1:3 con una arena de densidad 1,5 g/cm³ podemos encontrarnos las siguientes variables: cal en pasta (como la de Don Emilio Quílez con una densidad de 1,14 g/cm³), o cal en polvo (CLS dp con una densidad de 0,4 g/cm³) lo que se traduce en resultados tan dispares como:

Dosificación	Medida	Materiales
1:03	Volumen	Cal en pasta : árido
1:04	Peso	Cal en pasta : árido
01:02,8	Volumen	CLSdp : árido
01:10,6	Peso	CLSdp : árido

Tabla 2: Equivalencias partiendo de una dosificación 1:3 en volúmenes de cal en pasta y árido

Evidentemente el asunto es aún más complejo cuando queremos averiguar la dosificación de un mortero histórico, dato fundamental para cualquier intervención en restauración que precise de la caracterización de los materiales. Existen diferentes herramientas y técnicas de análisis que pueden ofrecer una información muy valiosa, por ejemplo la observación de la lámina delgada a través de microscopio petrográfico, que permite determinar, sobre una muestra, el porcentaje de superficie ocupado por poros, áridos y conglomerante, aunque será necesario procesar estos datos e introducir la formulación de pesos y densidades para hacer una buena estimación.

Pero podemos obtener distintas expresiones de dosificación para una misma muestra, dependiendo de si los datos los referimos a superficies, volúmenes, pesos y si la cal es en polvo o en pasta.

Dosificación		
1:01	Superficie	Masa Aglomerante : árido
01:00,3	Volumen	Cal en pasta : árido
01:00,5	Peso	Cal en pasta : árido
01:00,3	Volumen	Cal en polvo : árido

Tabla 3: Equivalencias partiendo de una dosificación 1:1 de superficies de masa aglomerante y árido observadas en microscopía, para las cales en pasta y en polvo usadas en la tabla 2.

Como puede observarse el asunto dosificaciones es un problema que no tiene una respuesta única o fácil: para responder a la pregunta ¿qué es una dosificación 1:2? necesitamos más información: pesos, volúmenes, densidades, pastas, polvo, etc.

5. La pérdida del oficio precisa materiales robustos

De todas maneras, la problemática del uso de la cal en construcción no viene sólo dada por los materiales, su nomenclatura o las distintas dosificaciones. El uso de la cal precisa de una manera de trabajar tradicional que viene asociada al oficio, a un ritmo de trabajo que respetaba los procesos constructivos y de maduración de los materiales y con una programación de los trabajos hecha con mucha previsión. Tradicionalmente los procesos constructivos eran lentos lo que permitía que la obra se asentase lentamente a medida que se levantaban los muros. La pérdida del agua y la incorporación del CO₂ se producían a medida que envejecía la obra y aumentaba la rigidización de los materiales por su carbonatación, y todo ello a un ritmo compatible con el proceso constructivo.

Hoy en día, con el uso del cemento, que adquiere resistencia, rigidiza y endurece muy deprisa, hemos asumido nuevos ritmos de construcción más rápidos, con un material que viene en sacos pesados y por lo tanto dosificamos en pesos. Además el tema del agua se complica porque una parte importante de la que se incorpora para el amasado, queda incluida en la estructura cristalina (fraguado hidráulico) y esto en cambio no sucede con el uso de la cal, como ya hemos comentado anteriormente. En consecuencia, los operarios actualmente acostumbrados al uso del cemento, cometen errores cuando intentan hacer uso de la cal por una cuestión de falta de oficio y de cultura de la cal.

La pregunta es: ¿es posible aprender el oficio?

Sí, es posible. Podemos formar unos especialistas a través de las escuelas taller y de las escuelas de oficios, pero ciertamente, la mayoría de los operarios del sector de la construcción acceden a este mundo laboral por otros caminos. El sector, junto con el de la hostelería, actúa como esponja social incorporando en momentos de necesidad a trabajadores de escasa formación o provenientes de otros sectores laborales en proceso de reconversión o desaparición.

Considerar que el problema de falta de calidad en los trabajos es sólo debido a la falta de oficio es un error. Parafraseando a Álvaro García Meseguer, podemos decir que “la falta de oficio no es el problema, es un dato del problema”, y con el que hay que lidiar.

Ante esta realidad, la industria ha respondido ofreciendo materiales más homogéneos y robustos que los que usan los artesanos, productos que admiten mejor desviaciones como, por ejemplo, dosificaciones poco precisas o el aporte de agua excesiva para aumentar la trabajabilidad. Los morteros industriales permiten márgenes de error más pequeños y además, en general, disponen de asistencia técnica, asesoramiento, instrucciones de uso, etc. El constructor acaba acudiendo al mercado y por ello es necesario que los morteros industriales sean de calidad y ofrezcan unas prestaciones correctas.

Así, coexisten simultáneamente, dos tendencias claras en las intervenciones: las obras que necesitan la participación de expertos en materiales para que asesoren cuando hay que tomar decisiones muy específicas y operarios con oficio formados en las escuelas, generalmente para obras patrimoniales, y las obras en general, que trabajan con mano de obra poco especializada, con los productos industriales y el asesoramiento técnico de las propias empresas fabricantes.

6. Distintas cales para distintas aplicaciones

Con todo, podemos ver que la diversidad de cales y de morteros es una oportunidad y no un problema. Hay que conocer bien las necesidades de cada aplicación para tomar las decisiones correctas en cuanto a las prestaciones que deseamos de los productos, acertar con aquellos que son adecuados y distinguir los que no lo son.

En algunas obras puede darse el caso de que deban diseñarse morteros a medida para dar una respuesta muy concreta: por ejemplo cuando se producen capilaridades con presencia de sales y hace falta aplicar un mortero específico que, generalmente puede encontrarse en el mercado. Hay otros casos, muy poco comunes, con problemas de compatibilidad entre los materiales, como por ejemplo los soportes a base de yesos y en los que es posible que se deba diseñar un mortero a medida. Y en obras de restauración, en las que se quiere reproducir un mortero histórico, no se puede recurrir a los morteros industriales.

Para decidir cuál es el producto más adecuado hay que recabar la información sobre permeabilidad, color, resistencia, etc. y hay que saber qué morteros son los que se ajustan mejor a las exigencias del proyecto.

En restauración, los morteros de cemento portland en general dan más problemas por ser menos deformables que los de cal, y en consecuencia funcionan mejor los segundos en aquellas estructuras que también son deformables. Pero si estamos intentando inyectar un mortero en el interior de un muro de dos hojas para consolidarlo porque se está abriendo y se repara con un mortero de cal aérea, deberán pasar siglos hasta que se produzca la carbonatación necesaria, dado que se precisa la existencia de CO₂ en el ambiente. Así, en este caso, será

mejor solución acudir a una reacción hidráulica o puzolánica: una cal hidráulica, una cal aérea con puzolanas, metacaolín, sílice o chamota, para que den una cierta reacción puzolánica.

En cambio, si lo que se pretende es un acabado muy impermeable debemos ir a soluciones que cierren muy bien el poro por fuera, y en este caso un mortero de cal aérea, que es un mortero permeable y que respira muy bien, no es adecuado, ya que seguramente sería mejor solución buscar un mortero de cal hidráulica de baja resistencia, que es bastante más impermeable y que también deja respirar.

Es decisión por lo tanto del proyectista o de la dirección facultativa escoger el material adecuado para los distintos usos, con la idea de no usar en obras de restauración y rehabilitación morteros de cemento y apostar por el uso de la cal.

Podríamos terminar diciendo que hay que seguir la senda marcada por el aceite o el vino, que a pesar de ser productos tradicionales y locales, han conseguido en los últimos años y a partir del esfuerzo coordinado y cooperativo del sector, una denominación que se asocia con la calidad y la excelencia. Apostamos por el conocimiento científico en red, puesto al servicio del producto, y en colaboración con los fabricantes, productores, aplicadores y artesanos. Con esta intención hemos celebrado las II Jornadas FICAL, para generar sinergias que ayuden a una nueva consideración de la cal basada en la calidad, las prestaciones específicas y la mejora constante y documentada del producto. Esperamos haberlo conseguido.

Anexo 7 El forn de raig

Presentado: Il Jornadas Fical, UPC, Barcelona 2011,

ConveinoCalce 2012, Forum Italiano Calce, Lecce (Italia) 2010

Publicado: Il Jornadas Fical; Ed. UPC-Grup de Recerca GICITED; Bcelona; Ene.
2012

EL FORN DE RAIG

¹Ramírez-Casas J.*, ¹Navarro A., ²Rattazzi A. ¹Rosell J.R.,

¹Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Departament Construccions Arquitectòniques II, Barcelona, Spain. judith.ramirez@upc.edu

²Forum Italiano Calce

1.- Antecedentes

El presente trabajo, está enmarcado dentro del proyecto de recuperación y puesta en valor del patrimonio histórico artístico y natural del municipio de Calders (Catalunya, Espanya) bajo la denominación de “*Centro de Arte Contemporáneo y Sostenibilidad CACIS – El Forn de la Calç*”. Entre muchas otras actividades, una de las que se ha llevado a cabo ha sido la recuperación de los antiguos hornos de cal que en la actualidad forman parte del proyecto “*Ecomuseo del Moianès*”, que vehicula y coordina diferentes actuaciones de recuperación del patrimonio histórico-artístico en municipios limítrofes.

Hay que decir que el trabajo que se presenta está en proceso y por tanto aunque ya se disponen de bastantes datos concluyentes, falta todavía finalizar por completo el estudio.

2.- Objetivo

El objetivo de nuestro trabajo es la restauración y puesta en marcha de otro horno existente dentro del entorno de CACIS. Dicho horno es también pre-industrial, pero en este caso el horno difie-

re de los anteriormente mencionados por ser de eje vertical continuo (Forn de Raig). Los restos del yacimiento, que se encuentra en muy buen estado, nos da evidencias de un uso más o menos continuado y por tanto parece factible la posibilidad de fabricar cal durante unos días. No obstante se desconoce *a priori* su antigüedad, el tiempo en que estuvo en marcha y la periodicidad de las cocciones, el combustible utilizado y lo más importante, si el horno era de llama larga o de llama corta (por capas).

El desconocimiento de éstos y más detalles, y teniendo en cuenta que este tipo de hornos no son tan habituales como los de cocción intermitente, al menos en el territorio catalán, creemos que la experiencia adquiere un gran interés en muchos ámbitos; tecnológicos, históricos, arqueológicos, etc.

3.- Los hornos de cal

En Catalunya, a finales del S. XIX y durante la primera mitad del S. XX coexistieron dos tipos de hornos, los de producción intermitente (foto 1) y los de producción continua, aunque no queda claro si la utilización de uno u otro era en función de la cal que se pretendía obtener.

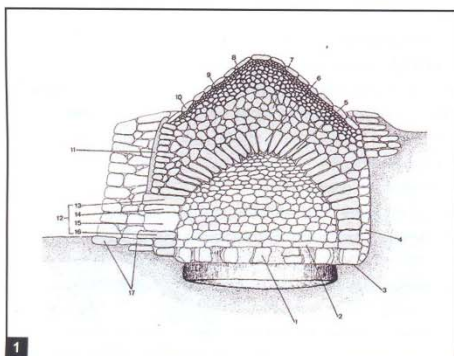


Figura 1
Sección de un horno de cocción espontánea de la comarca del Montsià (Catalunya).¹



Foto 1
Hornos de cal de “CACIS” (2010). Hornos intermitentes, aunque funcionaban de forma alterna y por tanto con un producción de la cal continua.

4.- Hornos de cal continuos

Los hornos verticales continuos de temprana edad, se caracterizan por una calcinación continua de la cal por capas, en el interior de una “chimenea”, alternando sucesivamente la piedra y el combustible. Hay muchas variables en cuanto morfología tanto de la chimenea como de la abertura inferior, por donde una vez calcinada la piedra ésta se extraía separándola de las cenizas gene-

radas por el combustible. La piedra caliza, debidamente machacada y evitando granulometrías excesivamente finas, se introducía en el interior por la boca superior del horno de forma paulatina e intercalando combustible, leña, carbón mineral o carbón vegetal. Otra modalidad de este tipo de hornos son los llamados de gran llama o llama larga, muy similares a los de calcinación periódica, por tener el hogar en la parte inferior, donde se quema el combustible directamente.

Las referencias más tempranas a las que hemos accedido de estos tipos de hornos son del año 1848, por parte de John Millington² autor inglés traducido al español por Mariano Carrillo de Albornoz (1848).

En los tratados muy anteriores a Millington, se explica muy detenidamente como debe ser la piedra caliza, en función del uso que se prevea del mortero de cal, si para edificar o para enlucidos.

“...Pero la piedra como quiera que sea causada para cal es más útil y de mas provecho que no cogida, y la que es sacada de cantera húmeda y sombría que no la que se saca de la seca, y de la blanca es mucho mas fácil de encender que no de la que es morena.”³ El mismo autor explica en párrafos posteriores, la importancia de la colocación de las piedras en el horno de tal manera que la cocción sea óptima.

Asimismo también el tiempo de cocción era un parámetro contemplado por varios autores, “...algunos dicen, que ha de arder veinte

y cuatro horas, otros sesenta, y todo lo remitirás a la experiencia del lugar, como queda dicho”⁴.

Otro aspecto importante a destacar y del cual se ha encontrado variedad de información es del tipo de combustible utilizado.

“...Hay quien dice que es mucho mejor cocer la piedra con carbón de piedra, que no con leña, asegurando que así no solo se quema con mas brevedad, sino que también sale la cal más jugosa y pegajosa”⁵.

Los autores clásicos también citan el apagado de la cal, y efectivamente este proceso de la producción condiciona la calidad de la cal.⁶

El primer documento que hace referencia (de los consultados por los autores de este trabajo) a un tipo de horno vertical continuo es de John Millington, Elementos de arquitectura del año 1848.

El tratado es sumamente interesante, aparte de incluir un dibujo del prototipo de horno (ver fig. 2), el autor lo define con gran exactitud.

EL FORN DE RAIG

La presente comunicazione rientra nell'ambito del progetto di recupero e valorizzazione del patrimonio storico, artistico e naturale del territorio comunale di Calders (Catalogna, Spagna) sotto la denominazione “Centro d'Arte Contemporanea e Sostenibilità CACIS – La Fornace di Calce”. Tra tante altre attività, una di quelle portate a termine è stata il recupero delle antiche fornaci di calce che attualmente rientrano nel progetto “Ecomuseo del Moianès”, progetto che veicola e coordina vari interventi di recupero del patrimonio storico-artistico nei comuni limitrofi.

L'obiettivo del nostro lavoro consiste nel restauro e nella messa in funzione di un'altra fornace esistente nell'ambito del CACIS. Anche questa fornace è di epoca pre-industriale, ma in questo caso ad asse verticale continuo (Fornace di calce). I resti del giacimento, che si trova in ottimo stato, presentano tracce di un uso più o meno continuato e pertanto sembra fattibile l'eventualità di produrre calce per alcuni giorni. Tenendo in considerazione il fatto che tale tipo di fornaci non sono molto usuali, riteniamo che questa esperienza assuma un interesse davvero rilevante sotto vari punti di vista e in svariati ambiti: tecnologico, storico, archeologico, ecc.

Proponiamo pertanto il progetto di restauro al fine di poter rimettere in funzione la fornace. Tale progetto prevede lavori preliminari che consistono in un'indagine storica documentale, nell'instaurare contatti con le fonti viventi (orali), nella caratterizzazione della pietra da estrarre e calcinare, nello scavo archeologico della base della fornace, ecc. Lo studio della costruzione e dei materiali che costituiscono il forno consisterà nei rilievi planimetrici e stratigrafici in pianta e in sezione, nella mappatura delle tipologie di materiali che costituiscono la fornace e delle patine e dei resti attribuibili alla combustione della medesima, ecc. Saranno infine proposti i materiali e le tecniche da utilizzare per l'esecuzione dei lavori di restauro.

Riteniamo che da questa esperienza si possano ottenere buoni risultati che potranno fornirci qualche risposta in merito al funzionamento di questo tipo di fornaci di epoca pre-industriale, sulle quali si hanno scarse informazioni. Questa esperienza sarà infine volta al recupero e alla conservazione del patrimonio industriale e al suo inserimento nel paesaggio rurale della zona.

EL FORN DE RAIG

This article lies within the framework of the project to recover and enhance the artistic and natural heritage of the municipality of Calders (Catalonia, Spain) entitled “Centro de Arte Contemporaneo y Sostenibilidad CACIS – El Forn de la Calç” (CACIS: Centre for Contemporary Art and Sustainability: El Forn de la Calç). Among the many activities carried out was the recovery of the ancient lime kilns, which currently come under the “Moianès Ecomuseum” project, which takes on board and coordinates a range of activities aimed at the recovery of the historical and artistic heritage of municipalities in the surrounding area.

The aim of our work is to recover another kiln within the scope of the CACIS project and render it operative once more. This kiln also belongs to the pre-industrial age, but is of the continuous vertical shaft type (Forn de raig). The remains of the deposit, which is in very good condition, indicates that the kiln was used more or less continuously, and the possibility of producing lime for several consecutive days appears feasible. Taking account of the fact that this type of kiln is not very common, we believe the experiment may prove interesting to operators in a number of fields: technology, history, archaeology, etc.

This must be preceded by a series of preliminary operations: historical and documentary research, the establishment of contacts with oral history sources, the analysis of the characteristics of the stone to be fired, the archaeological excavation of the base of the kiln, etc. The construction study and the study of the materials the kiln is made of, which will involve conducting planimetric surveys and stratigraphic surveys, with a side and plan view, mapping of the materials that make up the kiln and of the patinas and remains attributable to combustion, etc. Finally, a proposal will be put forward of the materials and techniques to be used for carrying out the restoration work.

We believe this experiment may yield positive results, and that it will also provide us with answers to a series of unresolved questions on how this type of pre-industrial kilns worked. In addition, the experiment will contribute to the recovery and conservation of industrial heritage and the integration thereof into the rural landscape of the area.

El horno descrito por este autor, tiene la figura de un cono inverso, excavado en el suelo y de altura entre 13 y 16 pies (de 4 a 5 mts), en la parte inferior una barras de hierro sostienen las parrillas, separadas entre ellas 1 pulgada (2,54 cm). Para iniciar la cocción, se enciende encima de las parrillas el carbón de piedra (mineral) y posteriormente se dispone encima de la primera capa

de piedra, reducida a pedazos hasta llegar a 10 pulgadas de espesor (25 cm), y de esta forma alternando carbón y piedra se llena el horno. La proporción piedra-carbón es de 10 a 1. El horno se mantenía encendido de forma continua durante algunos meses. Durante este periodo, cada 24 horas se sacaban una o dos barras de la parrilla para la descarga en el cenicero de la cal ya cocida.

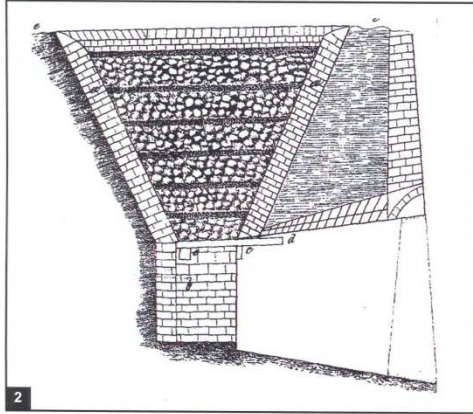


Figura 2

Figura extraída de *Elementos de arquitectura* de Millington, J., 1848.

No se puede afirmar con rotundidad que Millington fuera el primer autor en hacer referencia a este tipo de hornos, pero lo que si hemos constatado es que es a partir de éste cuando se encuentran tratados de diversos autores describiendo en mayor o menor detalle los hornos llamados “de llama corta” y los de gran llama o llama larga.

D. Nicolás Valdés (1870) destaca como ventaja de este tipo de hornos (a fuego continuo) su capacidad de aprovechar el calor y de esta manera ahorrar bastante en combustible. “El consumo de

este para los hornos continuos llega de 150 a 200 kg de bulla u 800 kg de leña por cada metro cúbico calcáreo.” Refiriéndose el autor a los hornos por capas.

Para acabar este apartado no debemos dejar de mencionar a P.C. Espinosa, que en su *Manual de construcciones de albañilería* (1859) nos detalla minuciosamente los diferentes hornos existentes en su momento (fig. 3), tipos, como construirlos, materiales, dimensiones, funcionamiento, productividad, todo ello ilustrado con unas magníficas láminas.

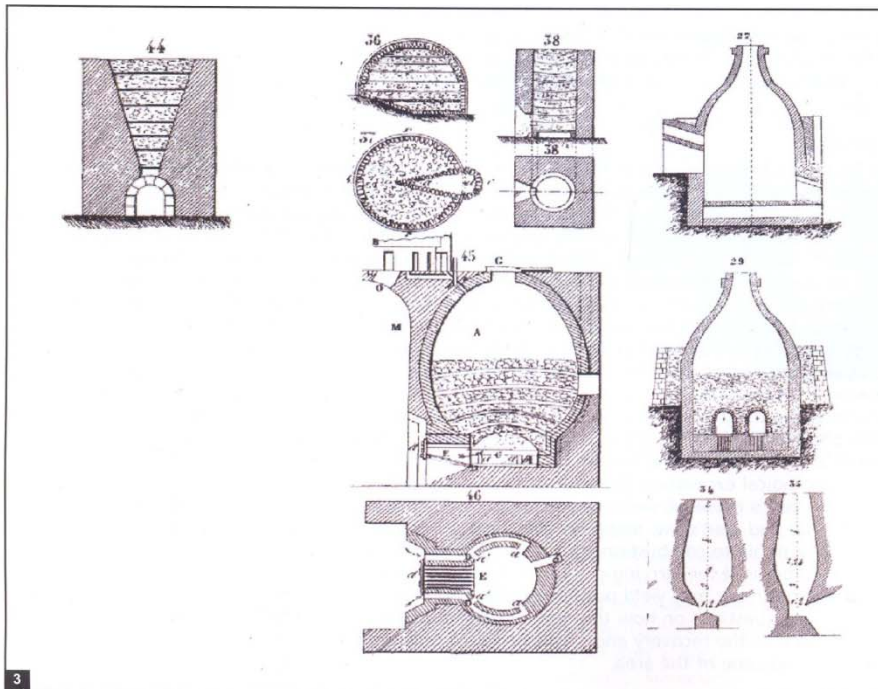


Figura 3

Imágenes extraídas del *Manual de construcciones de albañilería* de P.C. Espinosa (1859).

5.- Contexto geográfico y geológico del yacimiento

El yacimiento (ficha 1) está situado en la comarca del Bages (capi-

tal Manresa) en el límite entre los municipios de Calders y Artés en la provincia de Barcelona (Cataluña).

Ficha 1

Ficha del yacimiento..

YACIMIENTO	Forn de calç de raig de Calders
SITUACIÓN	E 412384.19, N 4625770.54 Decimales: 41.778947, 1.945711 Sexagesimales: 41° 46' 44.21" N, 1° 56' 44.56" E Altura: 378 metros
MUNICIPIO	Calders
COMARCA	Bages (Catalunya – España)
TIPO DE INTERVENCIÓN	Excavación arqueológica preventiva
PROTECCIÓN	Llei 9/1993, de 30 de setembre, del Patrimoni Cultural Català (DOGC NÚM. 1807, D'11.10.1993) Decret 78/2002, de 5 de març, del Reglament de protecció del patrimoni arqueològic i paleontològic (DOGC núm. 3594, de 13.3.2002)
INSTITUCIÓN AUTORIZADA	Universitat Politècnica de Catalunya (Laboratori de Materials de l'EPSEB)
MOTIVACIÓN	El estudio tecnológico, la futura restauración y puesta en marcha experimental del horno de cal a cargo de la EPSEB de la UPC

La zona presenta un clima mediterráneo subhúmedo de montaña media con tendencia a continental, caracterizado por una notable oscilación térmica, mucho frío en invierno y veranos calurosos.

Aunque sea una región de tamaño pequeño, es heredera de las grandes extensiones vinícolas de la Cataluña central. Los monjes del monasterio de Sant Benet de Bages impulsaron, desde el siglo X, el cultivo de la vid y la producción de vino en toda su área de influencia. Se convirtió en una de las principales actividades económicas hasta el siglo XIX.

La plaga de filoxera de finales del siglo XIX, y el alejamiento de las principales vías de comercialización, comportaron una fuerte crisis. Hasta finales del siglo XX no se recuperó la actividad eco-

nómica vinícola. Es importante destacar este dato para comprender que la mayor parte de la producción de cal de la zona estaba destinada a las viñas, mezclándola con el sulfato de cobre.

En cuanto al contexto geológico, el yacimiento se halla en la depresión del Ebro, donde afloran materiales de la era Cenozoica que rellenaron dicha depresión; en concreto estamos en la serie del Eoceno, piso Bartonense, formado por calizas biomicríticas, areniscas y calizas esparíticas.

La escala del mapa a 1:50000 (fig.4) no permite distinguir las variaciones litológicas encontradas y que se describen en el apartado 4.3, para este fin debería utilizarse un mapa geológico a escala 1:5000 que en la actualidad no existe.

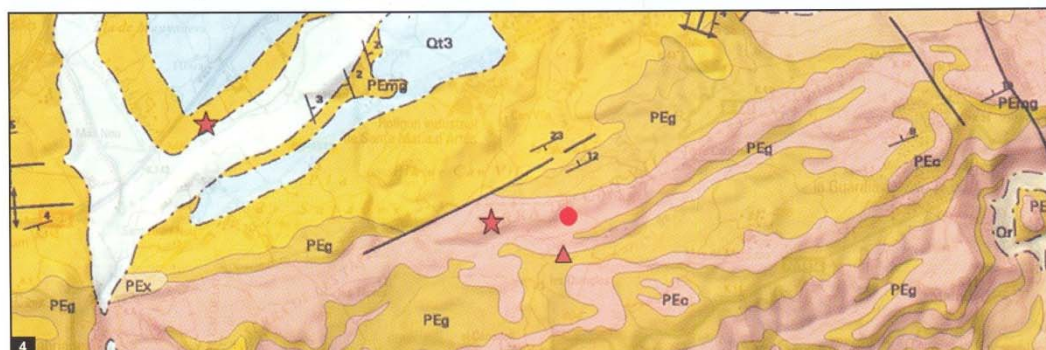


Figura 4

Mapa geológico de la zona a escala 1:50000, con la localización de la cantera, el horno continuo y los hornos intermitentes existentes en la finca.

6.- Fuentes de información, escritas y orales

La búsqueda de información escrita del horno ha sido poco fructuosa. El único documento con cierta información de la finca es una *"medición de las casas de campo"* que contiene este término municipal con los nombres de los dueños de ellas y de los que las habitan que fecha de 1873, y en el que se describe la propiedad y se hace referencia a la denominación *"...parte integrante del manso Torrecabota del término de Calders, situada en el punto vulgarmente llamado Forn del Raix..."*

Por otra parte hemos podido conversar con tres de los últimos trabajadores (fotos 2 y 3) de la explotación de los hornos y en este caso la información obtenida ha sido parcialmente satisfactoria. Uno de ellos Mateu Comellas, descendiente de caleros de profesión de los hornos que dan nombre a la finca, nos comentó que siendo él muy joven ya se conocía la existencia del horno de cal continuo, que parece ser ya lo consideraban entonces mucho más antiguo que los que se explotaban en ese momento, pero se desconocía quién lo había explotado y el motivo de su abandono.

No obstante las conversaciones han sido muy enriquecedoras, aportando datos de gran valor en cuanto al funcionamiento y explotación de los hornos de calcinación periódica y que seguramente en algunos aspectos habría coincidencias con diferentes procesos en la producción de cal del horno continuo.

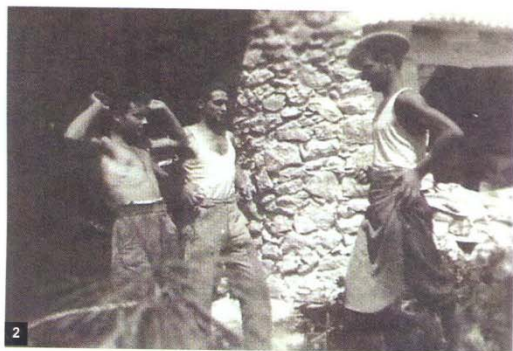


Foto 2
Trabajadores de los hornos. Año 1922.

7.- Descripción del horno

Originalmente el horno tenía una forma tronco piramidal, semienterrado por dos de sus laterales. De los paramentos, de fábrica de mampostería, se conserva íntegro el orientado a Este. En el paramento principal se encuentra la boca de acceso al horno de 1,85 mts de alto y que da paso a una precámara desde donde se accede a la chimenea interior (plano 1), ésta tiene una

Uno de los datos que podremos corroborar mediante caracterización es la existencia de dos tipos de piedra en la cantera, la “blanca” (*más dulce*) de mejor calidad y mejor cocción y la “azul” de cocción más lenta y peor calidad.



Foto 3
Trabajadores de los hornos. Año 2010.

altura de 5,20 mts, un diámetro máximo de 1,42 mts y mínimo de 0,82 mts (fotos 4, 5, 6 y 7) .

El horno se mantuvo en perfecto buen estado hasta el año 2006, que a causa de una lluvias torrenciales se produjo el derrumbe del paramento principal y del lateral (sur y oeste respectivamente). El resto de los elementos y sobretodo la chimenea, conservan su estado original. (Fotos 4, 5 y 6)



Foto 4
Vista general del horno tal y como se encontró (abril 2010).



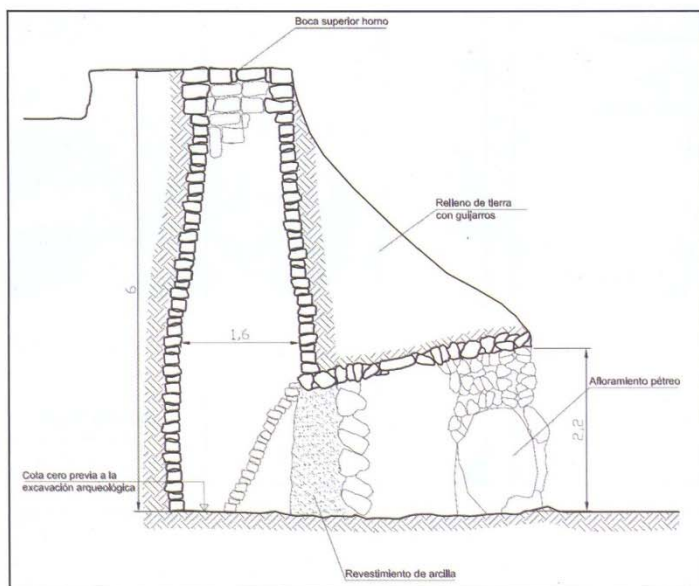
Foto 5
Boca superior del horno.



Foto 6
Puerta parcialmente tapada en la parte inferior.
30



Foto 7
Interior del horno, vista desde la parte superior.



Plano 1
Sección vertical del horno.

8.- Estudios a realizar

8.1.- Trabajos de Arqueología

Los objetivos son: Datación del yacimiento, funcionamiento (parrilas, etc), combustible utilizado, periodicidad y reparaciones efectuadas.

El programa de la intervención se basará en una excavación en extensión y en el registro de los diferentes niveles estratigráficos situados dentro y alrededor de la estructura, en un perímetro máximo de 6 metros. La metodología utilizada ha sido la propuesta por Harris⁹ y Carandini¹⁰, es decir una excavación en extensión con la documentación y registro pertinente para la interpretación de los hechos históricos del horno.

La intención será extrapolar toda la información posible de los estratos y registrar todas las Unidades Estratigráficas con dibujo, fichas, fotogrametría, fotografía i georeferenciación básica (cotas respecto del nivel del mar). A parte de la distinción en unidades estratigráficas (UE) se realizará también una concreción en hechos arqueológicos, conceptuados como un conjunto de unidades estratigráficas con un funcionamiento solidario y coherente.

Las planimetrías se efectuarán en el campo tomando puntos con Estación Total. Posteriormente se llevará a cabo una digitalización de los dibujos, en formato CAD.

Los materiales que esperamos encontrar en los estratos son sobre todo restos de cal, cerámicas y artilugios de funcionamiento del horno que una vez extraídos serán tratados en el laboratorio de forma diferenciada en función de sus características y posteriormente se inventará.

8.2.- Configuración material del horno

Aunque los trabajos de excavación arqueológica todavía no están acabados, ya disponemos de diferentes datos referentes a la configuración material del horno. En las inspecciones previas se ha podido comprobar la existencia de tres materiales distintos en la estructura interior del horno (chimenea y precámara), una parte superior de la chimenea (60 cm) formada de piedra, la parte interna del conducto de cerámica refractaria y en la precámara y a modo de formación de pasillo de acceso, cerámica roja. Asimismo queda evidenciada la utilización del horno por la pre-

sencia de vitrificaciones en las piezas cerámicas y de restos de cal en las juntas de las piezas. En cuanto a este aspecto se intentará averiguar la presencia de diferentes capas de vitrificación y que puedan corroborar un funcionamiento intermitente, aunque el tipo de horno sea de producción continua.

Otra evidencia de un uso más o menos continuado del horno, quizás pueda atribuirse a la presencia de 3 piezas del paramento Este, que presentan vitrificación. La imposibilidad de que se haya producido una vitrificación en el exterior, hace evidente que se han realizado reparaciones puntuales, aprovechando materiales del propio horno, en este caso piezas del interior.

El colapso del paramento frontal nos ha facilitado la comprensión de su construcción: envolviendo la chimenea existe un relleno de tierras con guijarros para la posterior disposición de los muros de mampostería con juntas de mortero de cal.

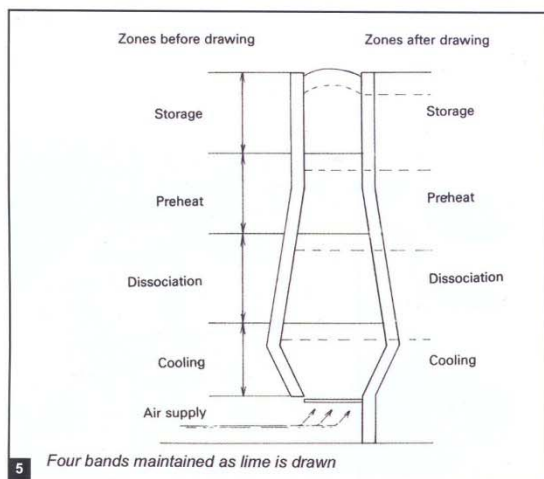
En este tipo de hornos es muy importante el mantenimiento de la temperatura del interior durante la cocción. La pérdida del calor a través de las paredes interiores, sobretudo en la zona de la chimenea donde se produce la calcinación, (fig. 5), aparte de desaprovecharse, puede derivar consecuencias negativas en cuanto a la calidad del producto obtenido.

La forma volumétrica del interior de la chimenea y su altura, no es trivial, según Michael Wingate¹¹, en la publicación; Small-scale Lime-Burning.

...*“Si no se dispone de una altura adecuada, el fuego puede subir tan alto que no se producirá el precalentamiento, o ser tan bajo que no será suficiente”*... (El autor se refiere a la calcinación). Wingate plantea dos aspectos importantes en el diseño, por un lado la distribución de las etapas de la cocción dentro de la chimenea, relacionadas con los diferentes diámetros y por otro la relación entre el diámetro máximo del interior y la altura total. (fig. 6).

Por tanto, una vez realizada, la excavación arqueológica y caracterizados los materiales en altura, sabremos se podrá comprender mejor el funcionamiento del horno.

Mencionar que en algunas zonas del paramento que ha permanecido en pie, el mortero de las juntas de la mampostería ha desaparecido, quedando algunos restos de los cuales se han extraído dos muestras para su caracterización (ver apartado 4.3).



8.3.- Caracterización de los materiales.

Los materiales que se han caracterizado de momento son: Los dos tipos de piedra obtenidos de la cantera mediante Microscopía óptica petrográfica, Difracción Rx y Termogravimetría. El mortero de las juntas de la mampostería, mediante la determinación del tipo de conglomerante y de árido y la granulometría de éste último. En cuanto al resto de materiales, está pendiente la caracterización de: Piezas cerámicas refractarias, piezas cerámicas rojas, restos de cal de las juntas y los materiales que posiblemente aparezcan una vez realizada la excavación arqueológica, tales como restos de combustible, artefactos férricos, sedimentos de cal, etc..

Caracterización de la piedra de la cantera:

Se han detectado dos tipos de piedra caliza en la cantera, una a la que se conoce localmente como "blanca" por ser más clara y blanquecina y la otra "azul" por su tonalidad azulada. La existencia de estos dos tipos de piedra coincide con la información facilitada durante las conversaciones con los caleros de los hornos de cocción espontánea de la finca (ver apartado 5).

La piedra "blanca", a partir de la muestra de mano (foto 8), es una roca cristalina, compacta, de grano muy fino, de color amarillento pálido (10YR 6/2) con zonas más claras (10YR 8/2)¹².

A partir de las micrografías realizadas, se determina que es una

roca bioconstruida, con identificación de algas tipo "branching" y corallinas, corales, foraminíferos (tipo miliólidos), bivalvos, gasterópodos y púas de equinodermo, fragmentos detríticos de composición carbonatada de tamaño micrita. Se visualizan fisuras recrystalizadas de esparita y algunos nódulos de óxido de hierro en una proporción inferior al 1%. Porosidad interparticular y intraparticular recrystalizada. La porosidad abierta es muy baja, aparentemente inferior al 1%.

Según la clasificación de Dunham¹³ (1962), esta roca se clasifica como un Packstone, con zonas con menos fragmentos tipo Wackestone.

La piedra azul" a partir de la muestra de mano (foto 9), roca cristalina, compacta, de grano muy fino y de color grisáceo (5B 6/1).¹⁴

A partir de las micrografías realizadas se identifica una matriz micrita (granos de calcita de medida inferior a 10 µm), engloba fósiles de algas tipo "branching" y corallinas de tamaño pequeño, foraminíferos (tipo miliólidos), y fragmentos de bivalvos, gasterópodos y púas de equinodermo. Aparece algún fragmento detrítico de composición carbonatada y silícica. Gran cantidad de fisuras vacías, que en algunas zonas presentan óxidos de hierro en una proporción inferior al 1%.

Según la clasificación de Dunham (1962), esta roca se clasifica como un Wackestone.



Fotos 8 y 9
Muestras de mano piedra "blanca" y piedra "azul" respectivamente.

A partir de los DRx con Siemens-D 500 con tubo de cobre, se observa que la muestra de piedra "blanca" es exclusivamente de calcita y la "azul" está formada principalmente por calcita y también ankerita (carbonato cálcico - magnésico y férrico) y cuarzo. En cuanto las termogravimetrías, éstas han corroborado la información obtenida de los difractogramas, que nos indican la presencia mayoritaria de calcita y que la roca "blanca" es mucho más pura que la "azul".

32

Caracterización del mortero de la mampostería

En cuanto a la caracterización del mortero de las juntas de la mampostería (foto 10), las dos muestras de mortero son de cal, con árido angular de composición calcárea (roca calcárea, polvo de mármol) y algunos granos de origen silícico, cuarzo, feldespatos y micas. (foto 11).



Fotos 10 y 11
Mortero de cal *in situ* en el paramento y mortero visto con lupa estereoscópica, respectivamente.

9. Siguientes pasos

Se ha mostrado una aproximación al estado actual de la investigación. Las siguientes etapas previstas son acabar los trabajos de excavación arqueológica, la caracterización de los materiales y artefactos que se encuentren, y en definitiva tener el más amplio conocimiento posible del horno.

Sin embargo, y aún siendo muy importante la caracterización de los materiales y el conocimiento del funcionamiento del horno, el objetivo final es la reconstrucción basada en un proyecto de restauración de este ejemplar del patrimonio industrial catalán.

Consideramos del todo necesario sumar al conocimiento adquirido, junto con la ilusión y voluntad de trabajo, y por qué no, los recursos económicos suficientes, la valorización e integración en el paisaje una construcción industrial significativa y al mismo tiempo fomentar el turismo cultural de la región.

Desde el punto de vista de la difusión de la cultura de la cal, esta puede ser una magnífica oportunidad para la realización de cursos, conferencias, talleres, etc. Y todo ello con un efecto local importante a nivel territorial.

NOTE

- ¹ Rosell J., Subirats, M. La producció de la calç, ahir. El procés pre-industrial de producció de calç, a la comarca del Montsià. CAATB (Barcelona 1987).
- ² Millington, J. Elementos de Arquitectura. Traducidos al castellano y aumentados en notas y apéndices por Carrillo de albornoz. Imprenta Nacional 1848. (Barcelona 1987).
- ³ Alberti, L. B. Los diez libros de arquitectura. Traducidos de latín en romance. (1592)
- ⁴ San Nicolas, Fr. L. Arte y uso de arquitectura. (1639)
- ⁵ Bails, B. Elementos de matemática. Tomo IX Parte I. Imprenta de la Viuda de D. joaquin Ibarra (Madrid 1796)
- ⁶ Rosell Amigó, J.R. y otros. Existen diferencias en las cales apagadas por distintos métodos tradicionales? la experiencia de Zone (BS). Arkos : ciencia e restaur. Núm. 22, Pgs. 34-39, 2010.
- ⁷ Valdés, N. Manual del ingeniero y arquitecto. 2ª ed. Imprenta de Gabriel Alhambra, Madrid 1870
- ⁸ Espinosa, P.C. Manual de construcciones de albañilería. Madrid 1859
- ⁹ Harris, H.C. Principles of Archeological Stratigraphy, London 1979
- ¹⁰ Carandini, A. Storie della terra. Manuale dello scavo archeologico. Bari, 1981.
- ¹¹ Wingate, M. Small-scale Lime-Burning. A practical introduction. Intermediate Technology publications. 1985.
- ¹² The Rock-color chart. Copyright 1991. Geological Society of America. Printed in the USA by Munsell Color.
- ¹³ Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture, in Ham, W. E. ed., Classification of carbonate rocks: Memoir 1, p. 108-121.
- ¹⁴ The Rock-color chart. Copyright 1991. Geological Society of America. Printed in the USA by Munsell Color.

PROFILO AUTORI

Judith Ramírez-Casas, Arquitecto técnico. Profesora TEU del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la UPC. Especialista en materiales de construcción y patología de los materiales. Profesora de las asignaturas de Materiales de Construcción I, II y Edificación y Medioambiente. Miembro del Laboratorio de Materiales de la EPSEB-UPC y del grupo de investigación GICITED.

Joan Ramon Rosell i Amigó, Arquitecto técnico e Ingeniero en Organización Industrial. Profesor TEU del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la UPC.

Especialista en materiales de construcción, patología de los materiales y experto en diagnosis de edificaciones. Profesor de las asignaturas de Materiales de Construcción I, Diagnosis en rehabilitación. Director del Laboratorio de Materiales de la EPSEB-UPC y miembro del grupo de investigación GICITED.

Antonia Navarro Ezquerro, Doctora en geología. Profesora asociada del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la UPC. Especialista en análisis de materiales de construcción. Profesora de las asignaturas de Materiales de Construcción I y Diagnosis en rehabilitación. Miembro del Laboratorio de Materiales de la EPSEB-UPC y miembro del grupo de investigación GICITED. Prof. Andrea Rattazzi: presidente de la Banca della Calce Srl. Laureato nel 1991 in Scienze Geologiche, è iscritto all'Ordine dei Geologi del FVG. Nel settembre 2007 ha fondato il Forum Italiano Calce, associazione di cui è Presidente. Dall'anno accademico 2001, è professore presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Bologna e, dal 2008, docente presso Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio del Politecnico di Milano. Come Esperto Scientifico, fa parte di commissioni tecniche istituzionali, UNI Beni Culturali e svolge attività di consulenza per Procure e Tribunali.

Anexo 8. Cuestiones de nomenclatura

Presentado: III Jornadas Fical; Universidad de Sevilla; Sevilla; set. 2012

Publicado: en proceso.

CUESTIONES DE NOMENCLATURA

Joan Ramón Rosell, Judith Ramírez-Casas
Universitat Politècnica de Catalunya
joan.ramon.rosell@upc.edu

Resumen

Alrededor de un material tan tradicional como es la cal, sus derivados y sus artes, existe una amplia nomenclatura. En tanto que las lenguas son el instrumento básico de la comunicación es muy importante la utilización de una nomenclatura igualmente interpretable por todos los agentes. Al mismo tiempo es imprescindible preservar las diferentes acepciones territoriales.

En el presente trabajo se exponen diversos casos de términos a los que se suele asignar distintas interpretaciones, lo que permite reflexionar sobre la necesidad de clarificar el o los distintos significados. Asimismo, y en tanto que sin duda alguna, las lenguas son cultura, se propone una iniciativa de trabajo multilateral de recopilación terminológica alrededor del mundo de la cal.

Introducción

Es curioso ver el efecto enriquecedor que produce, cuando uno se entretiene a analizar las distintas formas de nombrar una misma “cosa” según el territorio geográfico, cultural o simplemente por diferentes raíces lingüísticas. A lo largo de la historia se han dado distintos nombres a unas mismas cosas, técnicas, objetos, etc. Pero para entender los orígenes de las palabras debemos centrarnos en el discurso etimológico o de “las fábricas de los nombres”, pero no siendo este nuestro objetivo, sólo podemos resaltar una frase extraída de; V. El discurso y los nombres de las cosas. Lectura dialéctica de Platón, escrito hacia el 360 a.C.

“...no conozco para el nombre otra rectitud que ésta: el que yo pueda dar a cada cosa su nombre, el que yo haya dispuesto, y que tú puedas darle otro, el que, a tu vez, dispongas. De esta forma veo que también en cada una de las ciudades hay nombres distintos para los mismos objetos: tanto para unos griegos a diferencia de otros, como para los griegos a diferencia de los bárbaros”.

En dicha obra se exponen discusiones sobre si el significado de las palabras viene dado de forma natural, o si por el contrario es arbitrario y depende del hábito de los hablantes.

Al hablar de la cal, de sus técnicas de uso y de sus aplicaciones, también hallamos evidentemente diferentes formas de expresión, y no sólo nos referimos a la terminología popular, la derivada de la tradiciones (locales, familiares, etc.), sino también en la bibliografía de autores especialistas, ya desde el S.XVII hasta la actualidad; y si además añadimos las diferentes organizaciones de normalización, el abanico de nomenclaturas se amplía considerablemente.

En la Europa comunitaria se ha realizado un gran esfuerzo de normalización a partir de la Directiva Europea de productos para la construcción [1]. Para las cales de construcción el documento de referencia vigente es la norma UNE-EN 459-1:2010 "Cales para la Construcción - Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad" (2), que define las cales como:

"Óxido de calcio y/o hidróxido de calcio, y óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio, producidos por la descomposición térmica (calcinación) del carbonato de calcio natural (por ejemplo: caliza, Creta, conchas) o del carbonato de calcio y magnesio natural (por ejemplo: caliza dolomítica, dolomita)."

Y se refiere a la cal de construcción como:

"Grupo de productos de la cal, consistentes exclusivamente en dos familias: cal aérea y cal con propiedades hidráulicas, utilizadas en aplicaciones o materiales de construcción, edificación e ingeniería civil."

Siendo cal aérea:

Cal que se combina y endurece con el dióxido de carbono presente en el aire.

Y cal con propiedades hidráulicas:

Cal de construcción principalmente constituida por hidróxido de calcio, silicatos de calcio y aluminatos de calcio.

Así pues, cal es un término general que incluye las diversas formas químicas y físicas de la cal, en forma de óxidos, de la cal hidratada y de la cal hidráulica. Ésta además, puede ser rica en calcio, en magnesio o dolomítica.

Una cal rica en calcio, denominada cálcica, identificada por CL, "calcic lime" en [2], es aquella constituida principalmente por CaO y/o Ca(OH)_2 , sin ninguna adición hidráulica ni puzolánica. Si bien la normativa actual citada clarifica las definiciones, en nuestra historia reciente se han dado diferentes normativas que contemplan definiciones algo distintas. Asimismo también la bibliografía puede inducir a confusiones. Veamos algunos ejemplos:

De la cal grasa y la cal magra

La primera de las normas [3] definía la cal grasa como *"la cal aérea que contiene, como máximo, el 5% de MgO "*, mientras que *"la cal aérea que contiene más del 5% de MgO , sobre muestra calcinada"* se denominaba cal dolomítica o cal gris.

En la norma siguiente cronológicamente [4] ya no aparecía el término cal grasa, que tampoco se repite en las normas posteriores incluida la vigente actual.

Frente a esta realidad normada, suficientemente clara, se encuentran las diferentes nomenclaturas utilizadas en distintas publicaciones anteriores y posteriores. Sin la pretensión de ser exhaustivos, seguidamente se muestran

diferentes referencias, algunas consideradas como próximas en nuestra formación, otras de uso común en el sector.

En 1907, Ignacio Vizcaíno, en una publicación “científica” de ensayos de materiales [5] cita únicamente dos tipos de cal: cal grasa y cales hidráulicas.

En 1933, L. Mazzocchi, en “Cales y cementos” [6], define cal grasa, aproximadamente, como nuestro equivalente contemporáneo de cal cálcica aérea. También define, entre otros, cal fuerte y cal árida.

“La cal grasa es..., constituida por más de 90 por 100 de óxido de calcio...”,

“La cal fuerte es una cal débilmente hidráulica. Procede de calizas que contienen un 10 por 100 de arcilla”

“Llámense cales áridas las procedentes de la calcinación de las calizas magnesianas (dolomías). Pueden contener hasta un 50 por 100 de magnesia, pero, en general, basta el 10 por 100 para hacer árida una cal.”

I. Clasificación de las cales en relación con la composición de la caliza				
	Producto	Índice de hidraulicidad	Por 100 partes de caliza	
			arcilla	carbonato de cal
1	Cal grasa . . .	0,00 a 0,05	0,00 a 5,00	100,00 a 95,00
2	Cal fuerte . . .	0,05 » 0,10	5,00 » 5,30	95,00 » 94,70
3	Cal débilmente hidráulica . . .	0,10 » 0,16	5,30 » 8,20	94,70 » 91,80
4	Cal medianamente hidráulica	0,16 » 0,31	8,20 » 14,80	91,80 » 85,20
5	Cal propiamente hidráulica	0,31 » 0,42	14,80 » 19,10	85,20 » 80,90
6	Cal eminentemente hidráulica	0,42 » 0,50	19,10 » 21,80	80,90 » 78,20
7	Cal límite o cemento de fraguado lento . . .	0,50 » 0,65	21,80 » 26,70	78,20 » 73,30
8	Cemento de fraguado rápido . . .	0,65 » 1,20	26,70 » 40,00	73,30 » 60,00
9	Cemento árido . . .	1,20 » 3,00	40,00 » 62,60	60,00 » 37,40
10	Puzolana . . .	más de 3,00	más de 62,60	menos de 37,40

Figura 1. Reproducción de la tabla 1 extraída del libro de Mazzocchi de 1933 (15), donde clasifica distintas cales de la época, a partir del índice de hidraulicidad de Vicat.

En 1953, Juan Bergós, en “Materiales y elementos de construcción” [7], facilita datos experimentales (densidades, agua de amasado, duración del fraguado, expansión, contracción, resistencia, etc.) de dos tipos de cales que define únicamente por cal magra y cal grasa. Nótese que para ambas cales cuantifica el agua necesaria para el amasado para una pasta pura (66% y 60% respectivamente), lo que denota que se trata de productos en polvo, previamente apagados.

En la edición de 1972 (primera edición 1939), Pere Benavent de Barberà, en “Cómo debo construir” [8] distingue entre cal hidráulica y cal de leña o grasa, y refiriéndose a la segunda dice:

“La operación de apagar la cal tiene por objeto convertirla en hidrato de cal. Según la cantidad de agua que se añada para apagarla, la cal grasa se apaga en polvo o en pasta (pasta de cal)...”

En 1991 (primera edición 1972 con título: Cales), Francisco Arredondo, en “Yesos y cales” [9] de forma muy parecida a la normativa vigente define:

“Cuando la cal aérea, tiene como máximo, un 5% de óxido magnésico, se llama cal grasa. Si contienen más de un 5% de óxido de magnesio, toma el nombre de cal dolomítica, cal gris, cal árida o cal magra.”

En 1980, Antonio Camuñas, en “Materiales de construcción” [10], cita la cal grasa sin concretar de qué producto se trata. Realmente este autor, que fue de referencia, junto a Arredondo (9) y a Orús [11], en los años 80' y 90', da un tratamiento al capítulo de la cal muy escaso hasta el punto que ni siquiera se refiere a la cal en pasta tradicional. Son los años de la excelencia del cemento en España.

En 1983, Félix Orús, en “Materiales de construcción” [11] define la cal grasa como:

“Si la caliza primitiva contiene hasta un 5% de arcilla, la cal que produce al calcinarse se la denomina cal grasa, y al apagarse da una pasta fina trabada y untuosa, blanca, que aumenta mucho de volumen, permaneciendo indefinidamente blanda en sitios húmedos y fuera del contacto del aire, y en el agua termina por disolverse.”

El mismo autor, en lo referente a las cales áridas o magras:

“Son las que proceden de calizas que aún teniendo menos del 5% de arcilla, contienen, además, magnesia en proporción superior al 10% (dolomías). Al añadirles agua forman una pasta gris poco trabada, que se entumece menos y desprende más calor que las cales grasas. Al secarse en el aire se reducen a polvo, y en el agua se deslíen y disuelven. Por estas malas cualidades no se usan en construcción.”

Como puede observarse la definición de cal grasa parece llevarnos a una cal en pasta, mientras que la afirmación categórica sobre las malas cualidades de la cal magra y su no utilización en construcción son absolutamente falsas.

Ignacio Gárate, en “Artes de la cal”, en sus distintas ediciones 1994 [12], 1998, 2000 y 2002 define:

“...Por adición de agua a la cal viva se prepara la cal grasa apagada que, según la cantidad de agua añadida, se presentará en forma de pasta (cal en pasta) o en forma de cal en polvo.”

“...Al añadir agua obtendremos la cal grasa apagada o hidróxido cálcico, que aparece en forma de polvo y que por adición de agua forma la cal en pasta.”

No es escrupulosamente coincidente con las limitaciones químicas referentes al MgO que definió la normativa, pero sus definiciones son suficientemente correctas, aún y dando a entender que la cal en pasta proviene de la adición de agua a una cal en polvo.

Efectivamente, y excluyendo alguna publicación reciente que sigue confundiendo cal grasa con cal en pasta [13] o que considera casi equivalente cal grasa a cal aérea y cal magra a cal hidráulica [14], esta pequeña historia ha inducido algunas confusiones que quedan superadas con los correspondientes textos normativos [4].

Resulta de interés recurrir a Vicat como fuente de la comprensión de las cales y los antecedentes de los cementos, a principios del siglo XIX.

En su publicación de 1818 [18], *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, clasifica las cales en:

1º **Cales hidráulicas**, aquellas que, cocidas de manera común, endurecen en poco tiempo bajo el agua sin la ayuda de ningún ingrediente extranjero.

2º **Cales comunes**, aquellas que no tienen esta propiedad.

3º Diremos que una **cal es grasa**, cuando, situada viva bajo un gran volumen de agua, absorbe para su fusión de 2,60 a 3,60 por 1 (estos valores expresados en peso), que es mediana, cuando, en las mismas circunstancias, absorbe de 2,30 a 2,60; y finalmente magra, cuando sólo puede tomar de 1,00 a 2,30.

Es especialmente interesante el planteamiento de Vicat, de clasificar por “consistencia” independientemente de la naturaleza hidráulica o no hidráulica, de las cales. Mientras que Rondelet (15), según cita Vicat, se limita a clasificar en función de la cantidad de arena que es capaz de “admitir”, desconociendo el comportamiento hidráulico. Este planteamiento permite la doble calificación grasa-media-magra y hidráulica-común, como muestra la figura 2.

De las cales en pasta y las pastas de cal.

Una segunda cuestión que merece nuestra consideración a efectos de nomenclatura son las cales en pasta y las pastas de cal. Aquí, una vez más, la referencia a la normativa es obligada.

Por una parte la UNE 41066 [3] no utilizó la expresión pasta de cal y definió la cal en pasta como:

“...cal apagada a la que se ha añadido durante su hidratación, un exceso de agua sobre la indispensable para formar el hidróxido. Ofrece un aspecto exterior pastoso.”

Con posterioridad la UNE 80-501-93 [4] no utilizó la expresión cal en pasta y si definió pasta de cal, cómo:

“Cal apagada mezclada con agua hasta la consistencia deseada, compuesta principalmente de hidróxido de calcio con o sin hidróxido de magnesio. Procede de la hidratación/apagado de cales vivas con un exceso de agua o de la mezcla de cales apagadas y agua.”

TABLEAU N° I.

COMPARAISON des diverses espèces de chaux qui ont servi aux expériences.

Numéros d'ordre.	INDICATIONS.	CARACTÈRES PRINCIPAUX DE LA PIERRE A CHAUX.				CARACTÈRES PRINCIPAUX DE LA CHAUX QUI EN PROVIENT.			QUALITÉ DE LA CHAUX
		Couleur.	Cassure.	Dureté relative.	Pesanteur spécifique.	Couleur avant l'extinction.	Couleur après l'extinction.	Quantité d'eau dont peut se saturer un kil. de chaux vive.	
1.	Pierre de Montelimar, dite de Serdeparc.	Gris cendré, coupé de bandes d'un jaune sale.	Irrégulière et terne.	0,263	2,367724	Blanc un peu sale.	Blanc sale.	1,18	Très maigre et éminemment hydraulique.
2.	Stalactite ocreuse tirée des environs de Souillac.	Jaune pain d'épice.	Irrégulière et brillante.	0,175	2,419353	Merde d'oie sèche.	Merde d'oie un peu jaun.	1,45	Très maigre et éminemment hydraulique.
2 bis.	Pierre de Viviers en Vivarais.	Blanc sale.	Irrégulière et terne.	0,150	2,540000	Blanc sale.	Blanc sale.	1,55	Très maigre et éminemment hydraulique.
3.	Pierre des environs de Nismes.	Blanc sale.	Irrégulière et brillante.	1,000	2,500000	Blanc très sale.	Blanc très sale.	1,67	Très maigre et éminemment hydraulique.
4.	Pierre de Labourgade, près de Montauban.	Blanc légèrement sale.	Irrégulière, aspect marneux.	0,096	2,060975	Terreuse, tirant sur la brique crue.	Mastic de vitrier un peu foncé.	1,76	Très maigre et éminemment hydraulique.
5.	Pierre des rochers qui entourent Périgueux.	Blanc sale.	Irrégulière, grenue et terne.	0,092	2,240506	Blanc sale.	Gris bleuâtre.	1,96	Maigre et hydraulique.
6.	Pierre dite de Chouin, tirée des bords du Rhône.	Gris de boue.	Irrégulière, avec points brillants.	1,000	2,651760	Légèrement fauve.	Blanc sale.	2,43	Moyenne et hydraulique.
7.	Pierre de St.-Céré, départ. du Lot.	Café au lait.	Schisteuse et dendritique.	0,770	2,653543	Jaune sale foncé.	Mastic de vitrier foncé.	2,46	Moyenne et hydraulique.
8.	Pierre de Cabessut, à Cahors.	Gris de boue.	Esquilleuse.	0,700	2,573172	Fauve, tirant sur le vert pâle.	Mastic de vitrier.	2,46	Moyenne et hydraulique.
9.	Pierre de St.-Georges, à Cahors.	Gris bleuâtre.	Esquilleuse.	0,597	2,625000	Mastic de vitrier.	Mastic de vitrier.	2,49	Moyenne, médiocrement hydraulique.
10.	Pierre de Rabot, à Grenoble.	Gris noir.	Esquilleuse.	2,000	2,692240	Blanc de lait.	Très blanc.	2,63	Grasse, commune.
11.	Pierre de Souillac, départ. du Lot.	Blanc sale.	Esquilleuse.	1,000	2,653000	Blanc de lait.	Blanc de lait.	2,68	Grasse, commune.
12.	Pierre des environs de Périgueux.	"	"	"	"	Blanc.	Très blanc.	3,13	Très grasse, commune.
13.	Pierre de Loupiac, départ. du Lot.	Blanc.	Irrégulière, à points brillants.	0,154	2,462680	Très blanc.	Très blanc.	3,15	Très grasse, commune.
14.	Pierre de Lanzac, départ. du Lot.	Blanc sale.	Irrégulière, à facettes brillantes.	0,666	2,532900	Très blanc.	Très blanc.	3,57	Eminemment grasse, commune.
15.	Pierre de Calviac-sur-Dordogne.	Jaune fauve.	Grenue.	0,079	1,986206	Gris cendré.	Blanc très sale.	1,44	Très maigre et commune.

Figura 2. Reproducción de la tabla 1 extraída del trabajo de Vicat de 1818 (5), donde clasifica distintas cales francesas de la época.

En la actualidad, la normativa de referencia es la EN 459-1: 2010 [2] y no utiliza ninguna de las dos expresiones anteriores. Define los productos como cales hidratadas con los distintivos (S) si corresponde a polvo, (S PL) para pasta y (S ML) para suspensión o lechada.

Cal hidratada en polvo es un polvo seco obtenido tratando la cal viva con suficiente agua como para satisfacer su afinidad química para la misma, en función de las condiciones de su hidratación.

Pasta de cal es el producto obtenido ya sea apagando la cal viva con agua, de acuerdo con las directrices del fabricante, ya sea mezclando cal hidratada (en polvo) y agua hasta la consistencia deseada. Así pues, el término más descriptivo "pasta de cal apagada" indica que se ha añadido un exceso de agua a la cal viva formando directamente la pasta, mientras que "pasta de cal hidratada" indica que la pasta ha sido elaborada mezclando cal hidratada seca (polvo hecho mediante un proceso industrial en el que se ha utilizado sensiblemente una cantidad estequiométrica de agua para hidratar la cal viva), con agua.

A los efectos del presente trabajo y consultados diversos profesionales del sector, se han simplificado las dos expresiones a:

Cal en pasta, la que ha pasado directamente de óxido a pasta y se ha conservado siempre con exceso de agua.

Pasta de cal, la fabricada a partir de añadir agua a un hidróxido mayoritariamente de calcio, en polvo.

En los países vecinos la problemática en este punto es similar. Quizás el caso más interesante es el de Italia que dispone de un término propio para describir la cal en pasta. Se trata de “*grassello*”. A. Rattazzi [16] propone para la pasta de cal proveniente de una cal en polvo el término “*pasta de calce idrata*” (pasta de cal apagada).

En terminología anglosajona las expresiones utilizadas por Hansen y otros [17] son “*slaked lime putty*” y “*hydrated lime putty*”.

Del hidrato de cal y el hidróxido de cal

Emilio Quílez¹, diferenciaba entre hidrato de cal y hidróxido de cal. Para él, hidróxido de cal era la consecuencia de mezclar cal (cálcica) apagada en polvo con suficiente cantidad de agua, mientras que el término hidrato definía una masa pastosa de cal y agua generada desde el apagado del óxido de cal y envejecido en balsa. Así hidrato equivaldría a cal en pasta añeja, mientras que hidróxido correspondería a pasta de cal.

Veamos lo que expone Elert [19] refiriéndose a los términos hidratación y apagado, donde utiliza hidrato para definir el producto final indistintamente:

Técnicamente, la hidratación y el apagado son términos sinónimos, sin embargo, por connotación popular, la hidratación produce un hidrato de polvo seco, mientras que apagado implica más agua y produce un hidrato húmedo en la forma de una masilla o pasta.

¹ En las primeras Jornadas Fical, en Mallorca, tuvimos la satisfacción de conocer a don Emilio Quílez, (este sí) “maestro de la cal”. Después colaboramos en una obra en Alicante y tuvimos diversas oportunidades de charlar de cal.

Estrictamente, en el caso de la cal, hidrato (Combinación de un cuerpo con el agua²) e hidróxido (Compuesto formado por la unión de un elemento o un radical con el anión OH-) son términos equivalentes.

Y muchos más....

Efectivamente, la lista de términos que merecen una aclaración, explicación complementaria, la contraposición de definiciones, los matices de acepciones locales, etc. es muy extensa.

Pensemos en mortero de cal, ¿lo llamamos así porque su conglomerante es únicamente la cal, porque incluye cal además de otros conglomerantes, porque la cal está presente en mayor cantidad que otro conglomerante? Basta pedir la ficha técnica de varios morteros de cal industriales para constatar lo impreciso del término “mortero de cal”.

Otros ejemplos, y de lo más relevantes serían aquellas técnicas de aplicación de la cal, oriundas y específicas de territorios concretos, como es el caso del enjalbegado, (blanquear las paredes con cal, yeso o tierra blanca, según la Real academia Española) pero que según los maestros andaluces (y seguramente en otras regiones también) es más que un blanqueado, es una técnica de revestimiento pigmentada. Según el autor Mallorquin, Miquel Fullana en su “Diccionari de l’art i els oficis de la construcció” [20] define; *emblaquinar*, como dar una o más pasadas de cal “hervida”, aclarada con agua, en las paredes, techos, etc. Su traducción al castellano es blanquear, encalar y enjalbegar.

Y podríamos también añadir los términos estuco y revocos con todas sus modalidades de acabados y texturas. La lista es interminable.

Conclusiones

A todo lo expuesto, se podría concluir que quizás sería útil, pero seguro que interesante, aglutinar la diversidad de conceptos, definiciones, nomenclaturas y en definitiva todo el lenguaje especial que nos une como personas relacionadas con la profesión y el oficio al entorno de la cal.

Como miembros de FICAL y con ánimo de incluir al resto de personas sensibles a todo lo que concierne a la cal, proponemos crear una base de datos terminológica ilustrada. Su origen no debe tener límites, ni disciplinares, ni de territorio, ni de conocimientos ya sean de oficio o científicos.

El soporte sería necesariamente virtual, y en la medida de lo posible, también el proceso de recopilación de información y de discusión terminológica.

Su clasificación podría ser; sobre el material en todos sus formatos, sobre las técnicas de aplicación, sobre las herramientas, actuales y no tan actuales pero todavía en uso y de todas aquellas soluciones constructivas cuya base, sea el uso de la cal.

² Del Diccionario de la Real Academia Española (RAE).

Entre todos podemos preservar la cultura de la cal, éste material universalmente conocido, ancestralmente utilizado y junto con alguno más, definitorio de la cultura mediterránea.

Referencias

- [1] Directiva 89/106/CEE (Productos de Construcción). *DOCE, Diario Oficial Comunidad Europea. Serie L, nº 40.* 11/2/1989 .
- [2] AENOR. UNE-EN 459-1 Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Madrid : AENOR, 2011.
- [3] Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo. UNE 41 066 Cales para construcción. Definiciones. Madrid : INRT, 1955.
- [4] AENOR. UNE 80-501-93 Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones. Madrid : AENOR, 1993.
- [5] Vizacino, Ignacio. *Ensayos de materiales de construcción de origen pétreo. especialmente de cementos y cals.* Madrid : s.n., 1907.
- [6] Mazzocchi, L. *Cals y cementos.* [trans.] L. Álvarez-Valdés. 2ª (puesta al día con la 6ª italiana). Barcelona : Gustavo Gili, 1933.
- [7] Bergós, Juan. *Materiales y elementos de construcción, estudio experimental.* Barcelona : Bosch, 1953.
- [8] Benavent, Pere. *Cómo debo construir.* Barcelona : Bosch, 1972.
- [9] Arredondo, Francisco. *Yesos y cals.* Madrid : Revista de Obras Públicas. E.T.S. Ingenieros de Caminos-Madrid, 1991.
- [10] Camuñas, Antonio. *Materiales de construcción.* Madrid : Latina Universitaria, 1980.
- [11] Orús, Felix. *Materiales de construcción.* Madrid : Dosat S. A., 1983.
- [12] Gárate, Ignacio. *Artes de la cal.* Madrid : Instituto español de arquitectura. Universidad de Alcalá de Henares, 1994.
- [13] S. Argano, M. Guixeras. *Cal aérea en pasta. Apuntes para su buen uso.* Barcelona : las autoras, 2009.
- [14] École d'Avignon. *Techniques et pratique de la chaux.* Paris : Eyrolles, 2005.
- [15] Rondelet, J. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir.*
- [16] A., Rattazzi. *Conosci il grassello di calce?* Monfalcone : EdicomEdizioni, 2007.
- [17] E. Hansen, C. Rodríguez-Navarro, K. Van Balen. *Lime puttyes and mortars. Insights into fundamental properties.* 53, 2008, *Studies in conservation*, pp. 9-23.
- [18] Vicat, L.J. *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires.* Paris : Chez Goujon, libraire de les AA. RR. Mme la duchesse de Berry et Mme la Duchesse d'Orléans, 1818.
- [19] K. Elern, C. Rodríguez-Navarro, E. Sebastian, E. Hansen, O. Cazalla. *Lime mortars for the conservation of historic buildings.* 1, s.l. : *Studies in Conservation*, 2002, Vol. 47, págs. 62-75.
- [20] M. Fullana. *Diccionari de l'art i els oficis de la construcció.* Mallorca, Ed. Moll, 1980.

Anexo 9. Grout puzolánico de altas prestaciones

Presentado: ConveinoCalce 2012, Forum Italiano Calce, Palermo (Italia) 2012

Publicado: en proceso.(Revista ARKOS Scienza e Restauro)


www.forumcalce.it
 il portale della calce



 UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO



GROUT PUZOLÁNICO DE ALTAS PRESTACIONES

CONVEGNO CALCE 2012 – Palermo 29 nov. – 1 dic. 2012
 Judith Ramírez Casas
 Roser Puchol
 Joan Ramon Rosell




Introducción	
Estado actual	
Premisas de la investigación	
Procedimiento experimental	
Análisis de resultados	
Conclusiones	

Introducción



Motivación

La creciente necesidad en el ámbito de la restauración de disponer de productos adecuados para consolidar elementos arquitectónicos con un valor patrimonial



Objetivos

Cómo formular un producto, para la ejecución de consolidaciones, a través de inyecciones, adecuado para la restauración de los elementos, que tienen como base el carbonato de calcio (CaCO_3)



Introducción



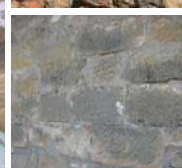
Propiedades deseadas para los productos de inyección

ESTADO FRESCO

- Adecuada trabajabilidad
- Tiempo abierto
- Alta penetración
- Distribución homogénea

ESTADO ENDURECIDO

- Densidad
- Sales solubles
- Permeabilidad y transpirabilidad
- Coeficiente de absorción de agua por capilaridad
- Apariencia y color
- Cohesión
- Adhesión
- Módulo elástico
- Dilatación y contracción térmica
- Retracción durante el curado
- Compatibilidad química



Estado actual



Consolidantes disponibles en el mercado

Consolidantes orgánicos

La gran mayoría de estos productos son sintéticos, y pueden ser aplicados en forma de polímeros disueltos o en forma de monómeros, en estado líquido o disuelto. En ambos casos, después de la aplicación, hay una polimerización del producto, en el interior del material tratado.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta resistencia química	Baja penetración
Alto rendimiento mecánico	Permeabilidad/ transpirabilidad diferente
Baja retracción durante el curado	Cambios de color
	Dilatación/retracción térmica diferente
	Ausencia de compatibilidad química

EJEMPLOS: RESINAS ACRÍLICAS Y RESINAS EPOXÍDICAS



Estado actual



Consolidantes disponibles en el mercado

Consolidantes silico-orgánicos

Estos productos son monómeros, que reaccionan en presencia de agua, formando sílice amorfa o un polisiloxano dependiendo de la naturaleza de los monómeros. Este tipo de consolidante, se hidroliza en presencia de agua dando lugar a la formación de sílice hidratada, que precipita, como material amorfo, que es el producto aglutinante.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Estabilidad química adecuada	Compatibilidad con CaCO_3
Adecuados rendimientos mecánicos	Permeabilidad/ transpirabilidad diferente
Penetración apropiada	
Distribución homogénea	
Trabajabilidad adecuada	

EJEMPLOS: SILICATO DE ETILO, POLISILOXANOS



Estado actual



Consolidantes disponibles en el mercado

Consolidantes inorgánicos

Estos consolidantes son sustancias inorgánicas que precipitan un compuesto, también de origen inorgánico, en el interior de la red porosa del material degradado, por reacción química. Esta sustancia tiene función aglutinante entre las partículas y se adhiere a los componentes minerales degradados.

EJEMPLOS: HIDRÓXIDO DE CALCIO, HIDRÓXIDO DE BARIO, FLUOSILICATOS, SILICATO DE SODIO Y POTASIO.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Elevada compatibilidad química	Bajos rendimientos mecánicos
Dilatación/retracción térmica similar	Baja penetración
Permeabilidad y transpirabilidad similar	Elevadas retracciones durante el curado
No produce cambios de apariencia	Tiempo de endurecimiento elevado
Módulo de elasticidad similar	



Premisas de la investigación



Marco general

Buscamos un producto consolidante de tipo inorgánico (basado en CaCO_3)

Utilización de cal aérea y cal hidráulica, producto inyectable y sin cemento.

Pretensiones de mejora

- PRESTACIONES MECÁNICAS FINALES	→	NANOSÍLICE Y MICROSÍLICE
- AUMENTAR PENETRABILIDAD	→	ADITIVO FLUIDIFICANTE
- EVITAR RETRACCIONES DURANTE EL FRAGUADO	→	ÁRIDO Y ZEOLITA
- REBAJAR TIEMPOS DE ENDURECIMIENTO	→	NANOSÍLICE Y MICROSÍLICE





Dosificaciones preliminares

Cal/Puzolana

Índice de hidráulidad

$$I = \frac{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{CaO}}$$

↓
↓

Productos Ácidos Productos Básicos

Objetivo: Conseguir un producto con fraguado totalmente hidráulico.

Hipótesis: Queremos un producto que tenga un índice de hidráulidad ≈ 1

Cálculo de las dosificaciones

CAL AÉREA

Se considera fraguado 100% aéreo

$$I = \text{SiO}_2/56$$

Por tanto; para $I=1$

$$\text{SiO}_2 \approx 56; \text{SiO}_2 \text{ pesa } 60 \text{ g/mol}$$

CAL AÉREA:PUZOLANA 1:1

CAL HIDRÁULICA

Se considera fraguado 33% aéreo

Dosificación NHL 3,5:

$$1/3 \text{ CS}, 1/3 \text{ Ca(OH)}_2 \text{ i } 1/3 \text{ CaCO}_3$$

Por tanto; $1/3 \text{ de Ca(OH)}_2 = \text{SiO}_2 \text{ utilizada}$

CAL HIDRÁULICA:PUZOLANA 1:1/3

ELEMENTOS	SÍMBOLO	MASA
Calcio	Ca	40,08 gr/mol
Oxígeno	O	16 gr/mol
Silicio	Si	28,08 gr/mol



Dosificaciones preliminares

Conglomerante (C) / Árido (A)

Objetivo: Conseguir un producto sin retracción durante el fraguado, con la dosificación mínima de árido.

Premisa: Utilización de las dosificaciones habituales $\rightarrow 1:1, 1:2, 1:3$

↓
Altas porosidades y bajas resistencias

Cálculo de las dosificaciones

CAL AÉREA

$$C = \Sigma \text{SiO}_2 + \text{CaO}$$

1 de CaO + 1 de Sílice = 2 partes de C

Por tanto para una relación C:A 1:1

$(1\text{Cal}:1\text{SiO}_2) : 2 \text{ Árido}$, es equivalente a $1(\text{C}):1(\text{A})$

Para el cálculo de las dosificaciones 1:2 i 1:3, procedemos de la misma manera.

CAL HIDRÁULICA

$$C = \Sigma \text{SiO}_2 + \text{CS} + \text{Ca(OH)}_2$$

$1/3 \text{ de CS} + 1/3 \text{ de Ca(OH)}_2 + 1/3 \text{ de Sílice} = 3/3 \text{ partes de C}$

Por tanto para una relación C:A 1:1

$(1/3 \text{ CS}:1/3 \text{ Ca(OH)}_2:1/3 \text{ SiO}_2) : 3/3 \text{ Árido}$

Existe $1/3$ que es CaCO_3 , y actúa como árido, realizamos corrección;

$(1/3 \text{ CS}:1/3 \text{ Ca(OH)}_2:1/3 \text{ SiO}_2) : (2/3 \text{ A}:1/3 \text{ de CaCO}_3)$,

que es equivalente a $1(\text{C}):1(\text{A})$

Para el cálculo de las dosificaciones 1:2 i 1:3, se procede de la misma manera.



Ensayos y pruebas previas

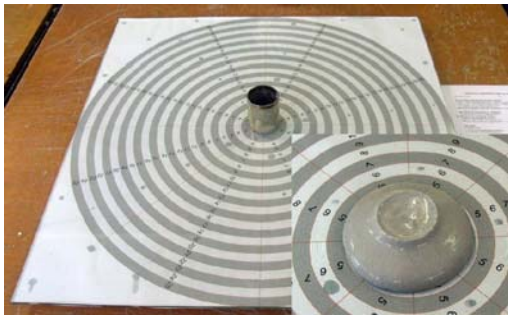
Objetivo: Determinar los % de los diferentes productos a utilizar en las dosificaciones finales:

- Agua, Fluidificante, Cal (aérea y hidráulica), Sílice (nanosílice y microsílice), Zeolita, Árido.

Aditivo reductor de agua

Finalidad: Establecer la dosificación de agua, el tipo de fluidificante y la cantidad del mismo, y los % de nanosílice y microsílice

ENSAYO TIPIFICADO



PROCEDIMIENTO

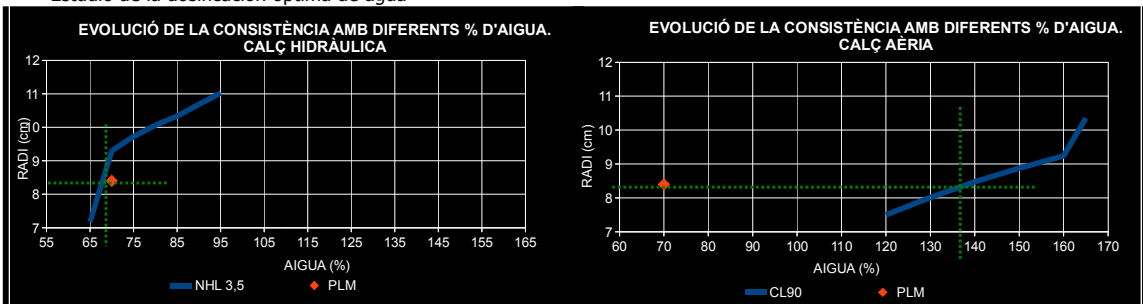
Se fija la consistencia deseada, la del PLM__8,4 cm. de radio, y añadimos el % de aditivo necesario para obtener este radio.

De las dosificaciones establecidas se escoge la que más se aproxima a este valor, con el % de aditivo mínimo.



Ensayos y pruebas previas

Estudio de la dosificación óptima de agua



Con los datos obtenidos durante la campaña de ensayos, se determina que el % H₂O óptimo;

- Cal aérea 135% de agua en peso de conglomerante
- Cal hidráulica 70% de agua en peso de conglomerante

Problemática con el aditivo reductor de agua



El aditivo fluidificante escogido genera burbujas de aire, debido a que lleva incorporado un espumante.

Se decide utilizar el aditivo Rheomix, con ciertas modificaciones en su composición.



Ensayos y pruebas previas

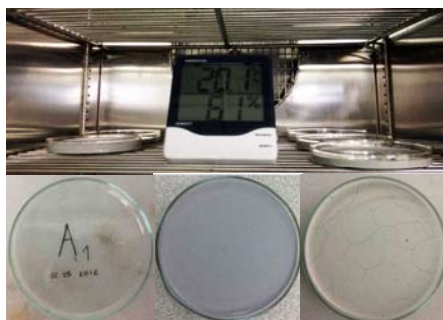
Objetivo: Determinar los % de los diferentes productos a utilizar en las dosificaciones finales:

- Agua, Fluidificante, Cal (aérea y hidráulica), Sílice (nanosílice y microsílice), Zeolita, Árido.

Aditivo reductor de la retracción (árido y zeolita)

Finalidad: Establecer la dosificación de árido y de zeolita óptima, que evitar la retracción durante el fraguado de la pasta.

ENSAYO TIPIFICADO



ADITIVOS/ADICIONES UTILIZADOS

Zeolita CN1 de Zeocat

Árido Micromar 250 Aymarsa

Fibras de vidrio

RELACIÓN CONGLOMERANTE/ÁRIDO

1:1, 1:2 y 1:3

PROCEDIMIENTO

Se fija la retracción deseada, la obtenida con el PLM. De las dosificaciones estudiadas se escogerá la que experimente la mínima retracción con el mínimo % de árido.



Ensayos y pruebas previas

RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Estudio de las mejoras aportadas por la zeolita y por el árido



Con los datos obtenidos durante la campaña de ensayos, se determina que;

- La cal aérea tenía más retracciones que la cal hidráulica.
- La zeolita, no parecía aportar grandes mejoras en las retracciones de la pasta.



Ensayos y pruebas previas

RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

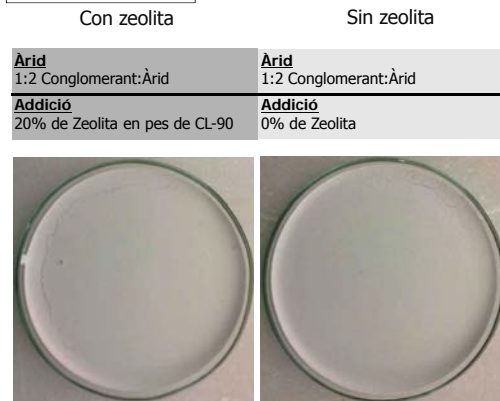
Dosificaciones de cal aérea y cal hidráulica escogidas para dosificaciones finales

CAL AÉREA



CIERTAS RETRACCIONES

CAL HIDRÁULICA



SIN RETRACCIONES



Campaña de ensayos finales

PLANTEAMIENTO DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS



Tipología de calç: NHL_Calç hidráulica / CL_Calç aérea
 Utilització d'àrid: +AR, presència d'àrid en la pastada
 Utilització de zeolita: +Z, presència de zeolita en la pastada
 Data: XX.XX.XXXX, dia, mes i any de producció de la pastada
 Codi de la proveta: 6 provetes per pastada.

NHL + AR + Z_26.04.2012_A

A/B/C_4*4*16
 D/E/F_4*2*16



		ENSAYOS			
		ESTADO FRESCO	ESTADO ENDURECIDO		
CAL AÉREA	SIN ZEOLITA	CL+AR_III	A/B/C FLEXOTRACCIÓN+COMPRESIÓN+CARBONATACIÓN D/E/F ABSORCIÓN+POROSIDAD+DESORCIÓN		NHL+AR_II
		CL+AR_IV	A POISSON B/C ABSORCIÓN SALES D/F PERMEABILIDAD		NHL+AR_III
	CON ZEOLITA	CL+AR+Z_II	A/B/C FLEXOTRACCIÓN+COMPRESIÓN+CARBONATACIÓN E/F PERMEABILIDAD		NHL+AR+Z_I
		CL+AR+Z_III	A POISSON B/C ABSORCIÓN SALES D/E/F ABSORCIÓN+POROSIDAD+DESORCIÓN		NHL+AR+Z_II
					CAL HIDRÁULICA



Campaña de ensayos finales

- Amasado : Ciclos de 240 segundos a velocitat lenta
- Amoldado No es vibren les provetes
- Envejecimiento: 60 días en cámara húmeda a 95% de humedad relativa

No se realizan los siguientes ensayos

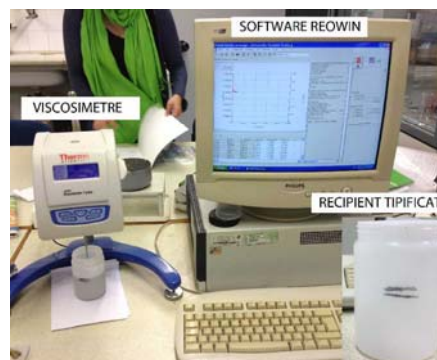
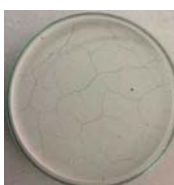
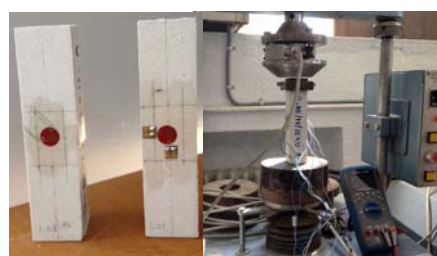
- Conductividad térmica
- Retracción aparente
- Densidad aparente/relativa del producto en polvo i distribución granulométrica
- Determinación del aire ocluido, adherencia al soporte.



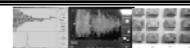
Campaña de ensayos finales

Se han incorporado los ensayos

- Coeficiente de Poisson
- Viscosidad
- Retracción durante el fraguado
- Desorción de agua libre



Análisis de resultados

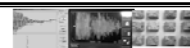


Resultados obtenidos

ASSAJOS ESTAT				ASSAJOS ESTAT ENDURIT														
cm.	S/U	S/U		Gpa		S/U	N/mm2	N/mm2	Kg/m3	%	kg/m ² ·min ^{1/2}	%HM/Hores	S/U	S/U	S/U			
CONSISTENCIA	RETRACCIÓ	VISCOSITAT		MOE LONGITUDINAL ULTRASONS														
				MOE LONGITUDINAL IMPACTE														
				MOE TRANSVERSAL IMPACTE														
				COEFICIENT POISSON														
				TENSIÓ MÀXIMA FLEXIÓ														
				TENSIÓ MÀXIMA COMPRESSIÓ														
				DENSITAT REAL														
				DENSITAT APARENT														
				POROSITAT														
				COEFICIENT D'ABSORCIÓ CAPIL·LAR														
				COEFICIENT DE DESORCIÓ														
				(M) NaOH														
				(M) Na2SO4														
				CARBONATACIÓ														
				RESISTÈNCIA CRISTAL·LITZACIÓ														
				SALS														
PRODUCTES FORMULATS																		
CALÇ AÈRIA SENSE ZEOLITA	8,4	M	B	5,5	4,5	3,9	0,18	3	42,7	1,6	2,6	34,8	0,34	-0,09	8,42	5,21	T	P
CALÇ AÈRIA AMB ZEOLITA	8,4	M	B	7	6	5,1	0,18	3,4	43,9	1,7	2,5	34,2	0,21	-0,11	7,25	1,41	T	T
CALÇ HIDRAULICA SENSE ZEOLITA	8,4	N	B	2,7	1,9	1,7	0,16	1,7	32,1	1,6	2,6	40,1	0,66	-0,08	6,38	2,31	T	P
CALÇ HIDRAULICA AMB ZEOLITA	8,4	N	B	3,8	2,9	2,5	0,17	3	43,3	1,6	2,6	39	0,59	-0,08	5,94	1,49	T	T
REFERÈNCIA PER CONSULTA																		
ANNEXES	A. 1	A. 2	A. 3	A. 4	A. 4	A. 4	A. 8	A. 6	A. 5	A. 9	A. 9	A. 9	A. 10	A. 11	A. 12	A. 12	A. 7	A. 13
PRODUCTES COMPARATIUS																		
LAB (PROYECTO EPSEB 2010)	-	-	-	9,2	8,9	8,7	-	3,7	11,6	1,7	2,6	34,7	0,863	-	9	31,4	P	NO R.
PLM (CTS)	8,4	N	B	-	-	-	-	2,6					0,65	-	-	-		

N_Nula, M_Moderada, B_Baixa, T_Total, P_Parcial, NR_No Resistent

Análisis de resultados



Análisis de resultados

DOSIFICACIONES DE LOS PRODUCTOS FORMULADOS VS PLM

CAL AÈREA		CAL HIDRAULICA		PLM
Sin zeolita		Sin zeolita		En %
En peso	En %	En peso	En %	
Conglomerant 300 grams de CL-90 285 grams de microsilice 920 E 15 grams de nanosilice 999	Conglomerant 24,24% (CL+micro+nano)	Conglomerant 600 grams de NHL 3,5 190 grams de microsilice 920 E 10 grams de nanosilice 999	Conglomerant 39,02% (NHL+micro+nano)	Conglomerant 48 %
Aigua 600 grams d'aigua	Additiu reductor d'aigua 2,2 % Rheomix modificat	Aigua 560 grams d'aigua	Additiu reductor d'aigua 2,01 % Rheomix modificat	Additiu 4%
Additiu reductor d'aigua 54 grams de Rheomix modificat	Arid 73,35 % Micromar 250	Additiu reductor d'aigua 41 grams de Rheomix modificat	Arid 58,79 % Micromar 250	Càrregues/ Arid 48 %
Arid 1800 grams de Micromar 250	Aigua 24,24 % del pes total de productes	Arid 1200 grams de Micromar 250	Aigua 27,44 % del pes total de productes	Aigua 70% en pes total
Con zeolita		Con zeolita		
En peso	En %	En peso	En %	
Conglomerant 300 grams de CL-90 285 grams de microsilice 920 E 15 grams de nanosilice 999	Conglomerant 24,09 % (CL+micro+nano)	Conglomerant 600 grams de NHL 3,5 190 grams de microsilice 920 E 10 grams de nanosilice 999	Conglomerant 36,76 % (NHL+micro+nano)	
Aigua 600 grams d'aigua	Additiu reductor d'aigua 2,24 % Rheomix modificat	Aigua 560 grams d'aigua	Additiu reductor d'aigua 2,57 % Rheomix modificat	
Additiu reductor d'aigua 60 grams de Rheomix modificat	Additiu reductor de la retracció 2,24 % Zeolita	Additiu reductor d'aigua 60 grams de Rheomix modificat	Additiu reductor de la retracció 5,52 % Zeolita	
Additiu reductor retracció 60 grams de Zeolita	Arid 71,43 % Micromar 250	Additiu reductor retracció 120 grams de Zeolita	Arid 55,15 % Micromar 250	
Arid 1800 grams de Micromar 250	Aigua 23,80 % del pes total de productes	Arid 1200 grams de Micromar 250	Aigua 25,73 % del pes total de productes	



Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EN PASTA

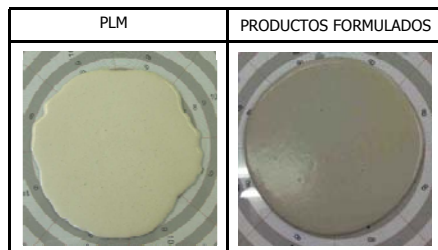
Consistencia

Productos formulados

	Resultado	% Agua	% Fluidificante
CL con zeolita	8,4 cm. de radio	24,24%	2,2%
CL sin zeolita	8,4 cm. de radio	23,80%	2,24%
NHL con zeolita	8,4 cm. de radio	27,44%	2,01%
NHL sin zeolita	8,4 cm. de radio	25,73%	2,57%

Producto de referencia

PLM	8,4 cm. de radio	70 %	≤4%
-----	------------------	------	-----



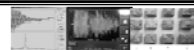
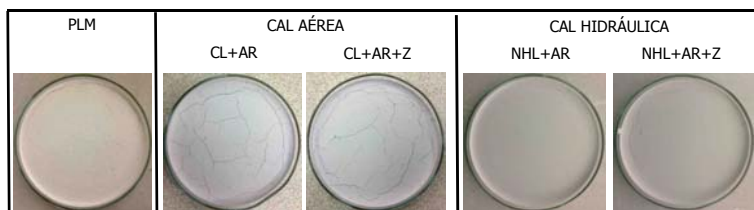
Retracción durante el fraguado

Productos formulados

	Resultado
CL con zeolita	MODERADA
CL sin zeolita	MODERADA
NHL con zeolita	NULA
NHL sin zeolita	NULA

Producto de referencia

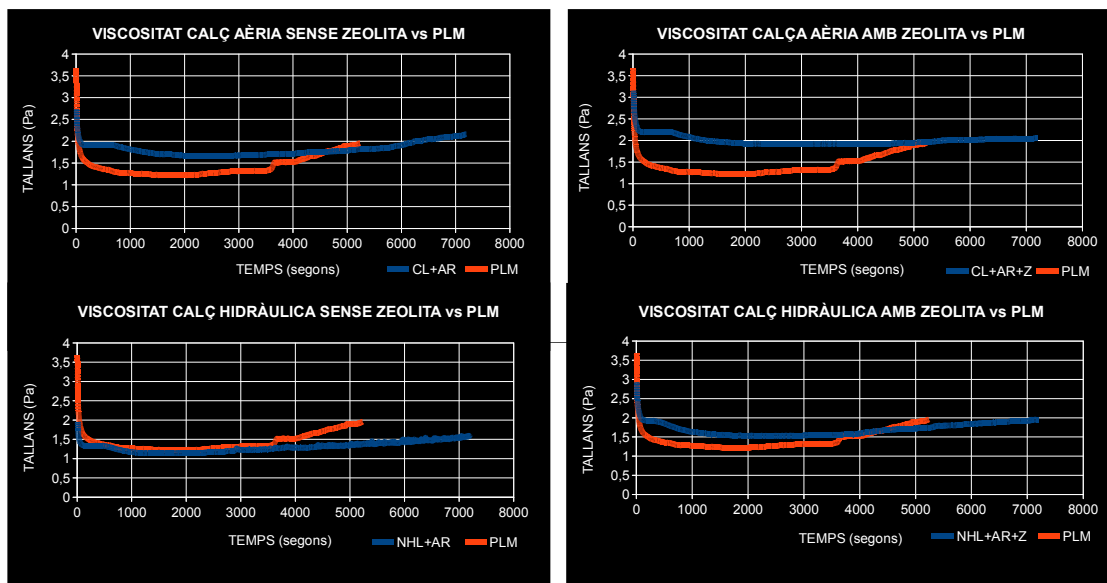
PLM	NULA
-----	------



Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EN PASTA

Viscosidad





Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

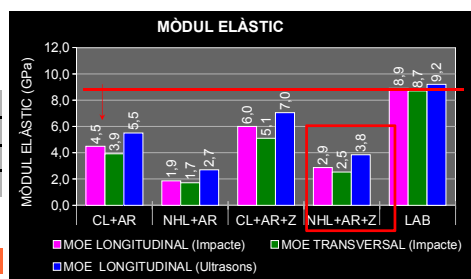
Módulo elástico (MOE)

Productos formulados

	MOE long. Impacto	MOE trans. Impacto	MOE long. Ultras.
CL con zeolita	6 GPa	5,1 GPa	7 GPa
CL sin zeolita	4,5 GPa	3,9 GPa	5,5 GPa
NHL con zeolita	2,9 GPa	2,5 GPa	3,8 GPa
NHL sin zeolita	1,9 GPa	1,7 GPa	2,8 GPa

Producto de referencia

LAB	8,9 GPa	8,7 GPa	9,2 GPa
-----	---------	---------	---------



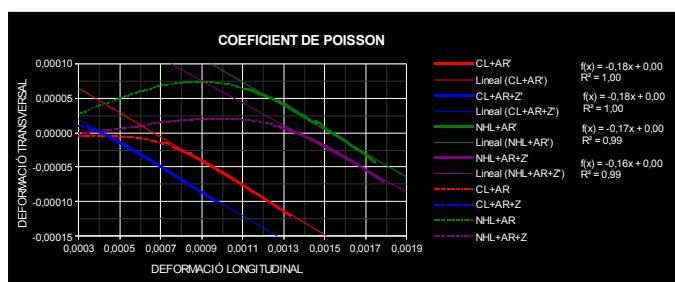
Coefficient de Poisson

Productos formulados

	Resultado
CL con zeolita	0,18
CL sin zeolita	0,18
NHL con zeolita	0,17
NHL sin zeolita	0,16

Valor de referencia

Según ciertos estudios	0,18-0,22
------------------------	-----------



Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

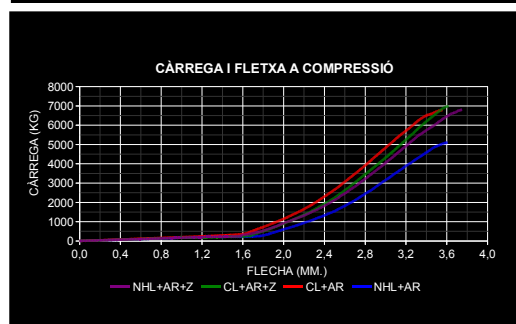
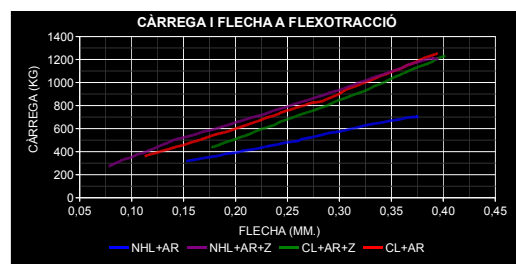
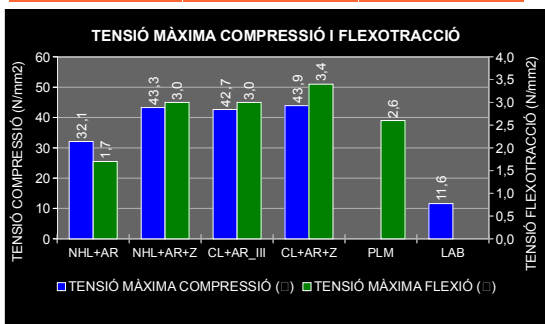
Resistencia a compresión i flexotracción

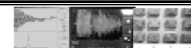
Productos formulados

	σ max flexotracción	σ max compresión
CL con zeolita	3,4 N/mm²	43,9 N/mm²
CL sin zeolita	3 N/mm²	42,7 N/mm²
NHL con zeolita	3,0 N/mm²	43,3 N/mm²
NHL sin zeolita	1,7 N/mm²	32,1 N/mm²

Producto de referencia

PLM/LAB	2,6 N/mm²	11,6 N/mm²
---------	-----------	------------





Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

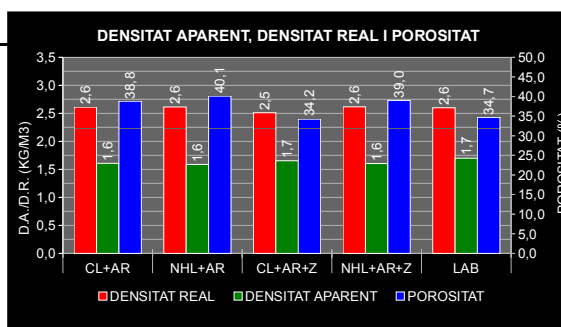
Densidad Real, Densidad aparente e "Índice de porosidad"

Productos formulados

	ρ real	ρ aparente	Porosidad
CL con zeolita	2,5 Kg/m ³	1,7 Kg/m ³	34,2 %
CL sin zeolita	2,6 Kg/m ³	1,6 Kg/m ³	34,8 %
NHL con zeolita	2,6 Kg/m ³	1,6 Kg/m ³	39,0 %
NHL sin zeolita	2,6 Kg/m ³	1,6 Kg/m ³	40,1 %

Producto de referencia

LAB	2,6 Kg/m ³	1,7 Kg/m ³	34,7 %
-----	-----------------------	-----------------------	--------



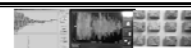
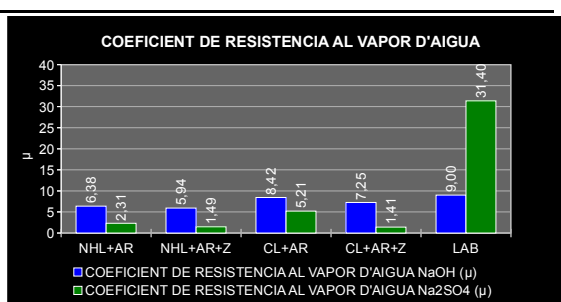
Permeabilitat al vapor d'aigua

Productos formulados

	μ Na ₂ SO ₄	μ NaOH
CL con zeolita	1,41	7,25
CL sin zeolita	5,21	8,42
NHL con zeolita	1,49	5,94
NHL sin zeolita	2,31	6,38

Producto de referencia

LAB	31,4	9
-----	------	---



Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

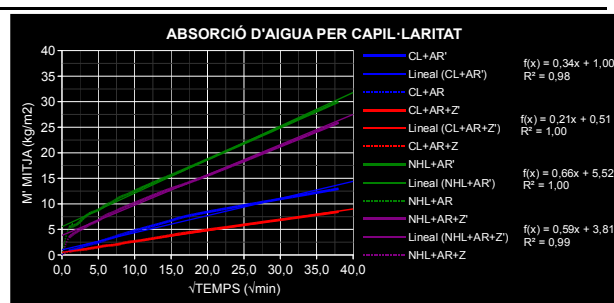
Absorción de agua libre

Productos formulados

	Coefficiente de absorción
CL con zeolita	0,21 kg/m ² *min ^{1/2}
CL sin zeolita	0,34 kg/m ² *min ^{1/2}
NHL con zeolita	0,59 kg/m ² *min ^{1/2}
NHL sin zeolita	0,66 kg/m ² *min ^{1/2}

Producto de referencia

PLM	0,65 kg/m ² *min ^{1/2}
-----	--



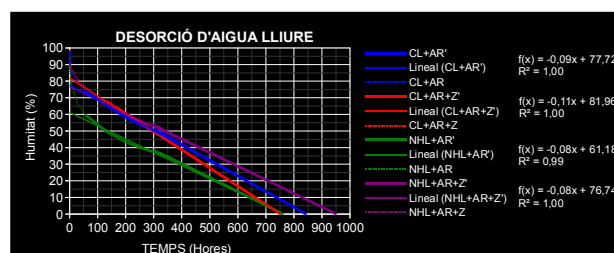
Desorción de agua libre

Productos formulados

	Coefficiente de desorción
CL con zeolita	-0,11 h / % humitat
CL sin zeolita	-0,09 h / % humitat
NHL con zeolita	-0,08 h / % humitat
NHL sin zeolita	-0,08 h / % humitat

Producto de referencia

Sin referencia














Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

Resistencia a la carbonatación


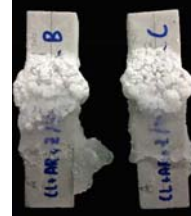







	CL+AR	CL+AR+Z	NHL+AR	NHL+AR+Z	LAB
60 DIAS FABRICACIÓN					
90 DIAS FABRICACIÓN					Sin modificaciones importantes



Análisis de resultados

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO ENDURECIDO

Resistencia a la cristalización de sales

	CL+AR	CL+AR+Z	NHL+AR	NHL+AR+Z	LAB
8 DIAS DE ENSAYO					
21 DIAS. FINAL ENSAYO					



Aptitud para las consolidaciones

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, TODOS LOS PRODUCTOS formulados son APTOS PER LA REALIZACIÓN DE CONSOLIDACIONES MEDIANTE INYECCIONES

Posibles aplicaciones de los productos formulados

- **NHL con zeolita** ha mostrado unos valores mas óptimos para consolidaciones de capas de adherencia de revestimientos, en los que no exista presencia de humedades por capilaridad.

EJEMPLO; Morteros de adherencia de baldosas



Estudios de ampliación del conocimiento

Capacidad de adherencia de los productos a los diferentes soportes
Forma y distribución de las porosidades

Tiempo abierto y forma de amasado
Fases hidráulicas y aéreas



Aptitud para las consolidaciones

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, TODOS LOS PRODUCTOS formulados son APTOS PER LA REALIZACIÓN DE CONSOLIDACIONES MEDIANTE INYECCIONES

Posibles aplicaciones de los productos formulados

- **CL sin zeolita** ha mostrado unos valores mas óptimos para consolidaciones de elementos estructurales, que no sean susceptibles de sufrir evaporaciones.

EJEMPLO; Cavidades interiores de muros de mampostería



Estudios de ampliación del conocimiento

Capacidad de adherencia de los productos a los diferentes soportes
Forma y distribución de las porosidades

Tiempo abierto y forma de amasado
Fases hidráulicas y aéreas

